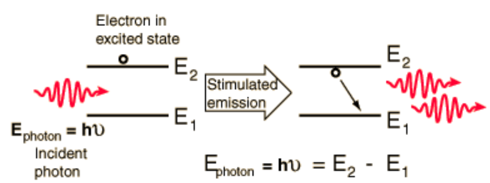
Τμήμα Χημείας   Πανεπιστήμιο Κρήτης

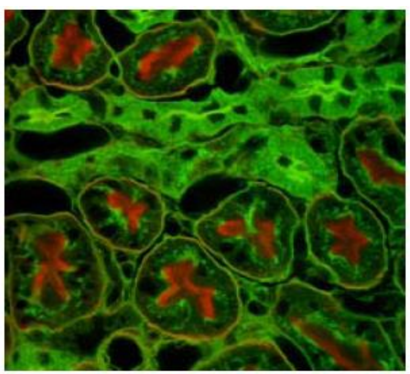
Εργαστήριο Φυσικοχημείας Ι

ΧΗΜ-311

Γ’ εξάμηνο 2019-20

Αρχές Λειτουργίας και Τύποι Λέιζερ
Παραδείγματα Φασματοσκοπίας Λέιζερ
Ασφάλεια Λέιζερ





Θ. Κιτσόπουλος, Δ. Άγγλος

Πηγή ἀκτινοβολίας Λέιζερ

(*LASER: Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*)

- Η ακτινοβολία λέιζερ παράγεται λόγω **εξαναγκασμένης εκπομπής** φωτονίων σε ένα ***ενεργό μέσο*** (αέριο, υγρό ή στερεό) το οποίο διεγείρεται (αντλείται) οπτικώς ή ηλεκτρικώς.
- Ένα λέιζερ κατασκευάζεται με την τοποθέτηση του **ενεργού μέσου** μεταξύ 2 κατόπτρων (**κοιλότητα**), η απόσταση μεταξύ των οποίων (συνήθως) είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού-μήκους κύματος της ακτινοβολίας.

$d = n\lambda/2, \;\; n = 1, 2, 3 \ldots$

Κυριότερα χαρακτηριστικά του λέιζερ

1. Κατευθυντικότητα δηλ. η μικρή απόκλιση της δέσμης. Επειδή (συνήθως) η ακτινοβολία πηγάζει από μια πολύ καλά ευθυγραμμισμένη κοιλότητα .
2. Μονοχρωματικότητα: Πολύ καλά προσδιορισμένο μήκος κύματος.
3. Υψηλή ένταση (ισχύς) δηλ πολλά φωτόνια ανά μονάδα επιφάνειας ανά χρόνο.
4. Συμφωνία (Coherence) δηλ. όλα τα κύματα των φωτονίων που εκπέμπονται έχουν την ίδια φάση

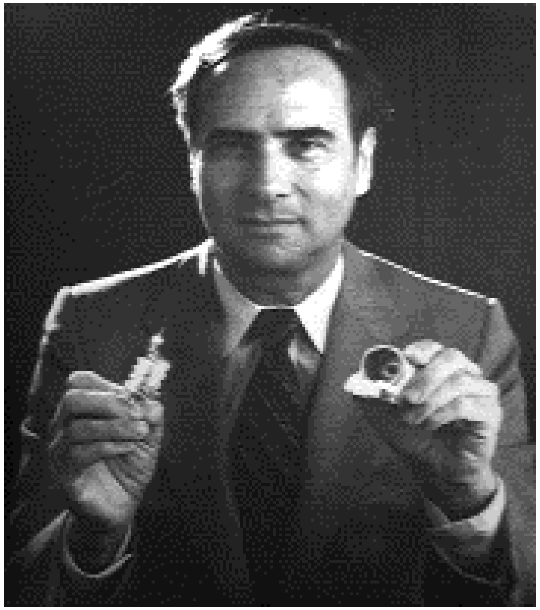
Ιστορικά στοιχεία

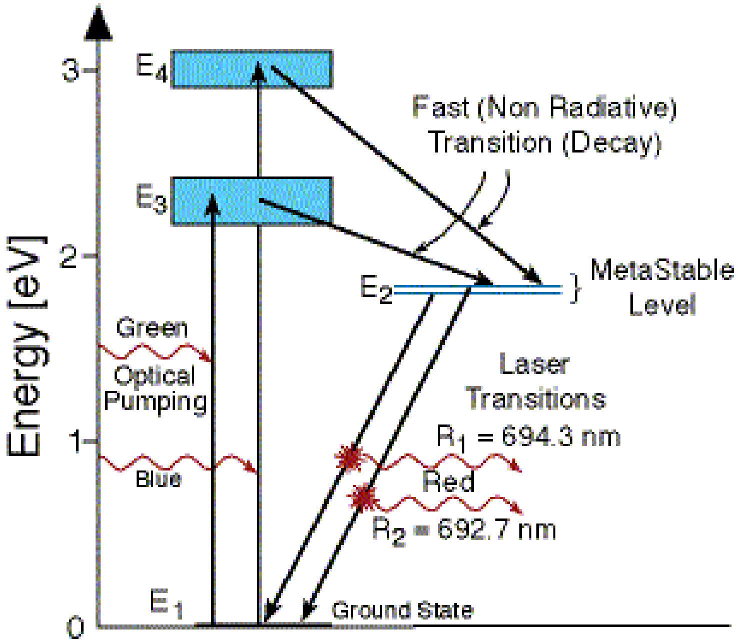
- 1917 - Einstein suggested possibility of stimulated emission.
- 1958 - Shawlow and Townes outlined conditions needed to amplify stimulated emission of visible light waves.
- 1960 - Maiman made first ruby laser, with light output at 694 nm.
- 1961 - Javan constructed the HeNe-laser.
- 1962 - Hall et al. discover the GaAs semiconductor laser.
- 1963 - Patel obtained laser action in CO_2.
- 1964 - Geusic and Marcos build the first Nd:YAG laser

  - Bridges obtained laser action in Argon-Ions. (Ar^+ laser)
- 1970 - Basov demonstrated the first excimer laser (Xe_2).
- 1975 - Ewing and Brau reported laser action on KrF an XeCl.
- 1985 - Matthews and Rosen demonstrated first x-ray laser
- 2001 - Papadogiannis, Charalambidis produce attosecond laser pulses

Το πρώτο laser Ruby Laser: $Cr^{+3}:Al_2O_3$

Theodor H. Maiman : 1960, *Nature*, **187**, 493





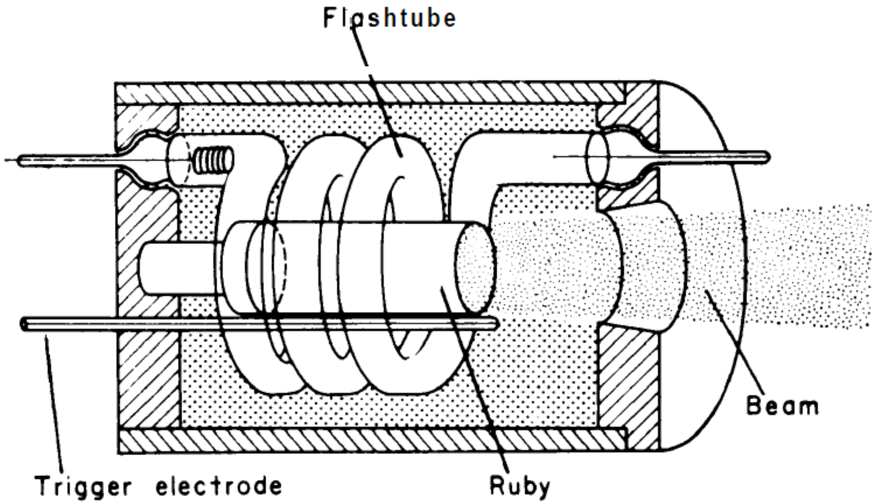


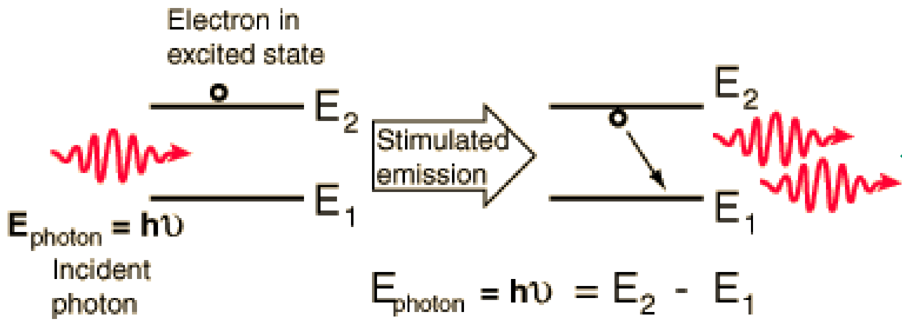
Fig. 2.1. The first experimental set-up of the ruby laser according to Maiman. The ruby rod in the middle is surrounded by a flashlamp in form of a spiral.

Βασική προϋπόθεση για δράση λέιζερ: *Αναστροφή πληθυσμού*

δηλ. θα πρέπει με κάποιο τρόπο να έχουμε μεγαλύτερο πληθυσμό στη διεγερμένη κατάσταση συγκριτικά με τη βασική.

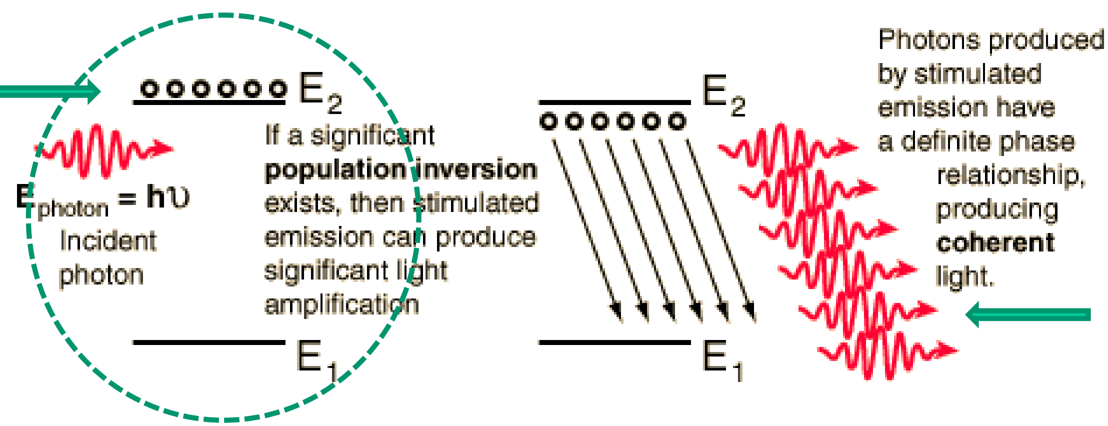
Η αναστροφή πληθυσμού απαιτεί ενέργεια (άντληση).

Αυτή η άντληση επιτυγχάνεται είτε με φωτόνια (οπτική άντληση) είτε με ηλεκτρόνια (ηλεκτρική άντληση).



Εξαναγκασμένη εκπομπή

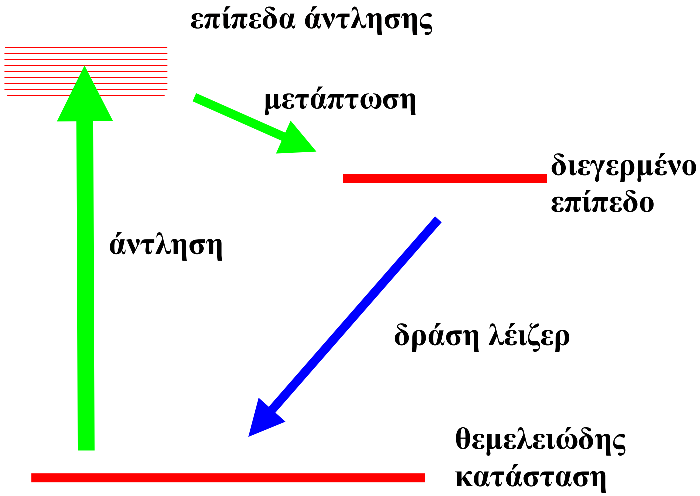
Αναστροφή πληθυσμών



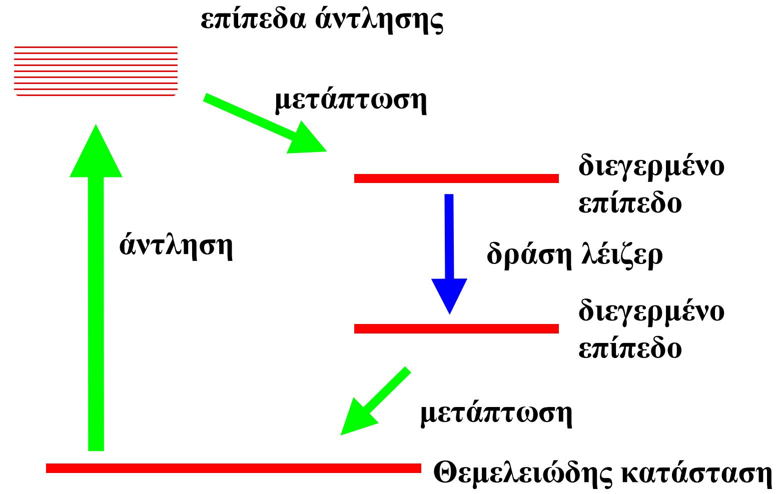
Εκπομπή σύμφωνης ακτινοβολίας

Συστήματα Λέιζερ

Στην πράξη αναστροφή πληθυσμών και ως αποτέλεσμα αυτής δράση λέιζερ είναι εφικτό να επιτευχθεί σε συστήματα τριών (3) ή τεσσάρων (4) επιπέδων.
ΔΕΝ ειναι εφικτή η παρατήρηση δράσης λέιζερ σε σύστημα δύο (2) επιπέδων. (Να αιτιολογήσετε).



λέιζερ 3 επιπέδων



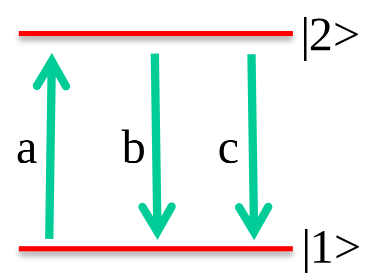
λέιζερ 4 επιπέδων

Βασικές διεργασίες στη λειτουργία των Λέιζερ

Απορρόφηση ακτινοβολίας - Διέγερση (a): $A + h\nu \rightarrow A^*$ B_{12}

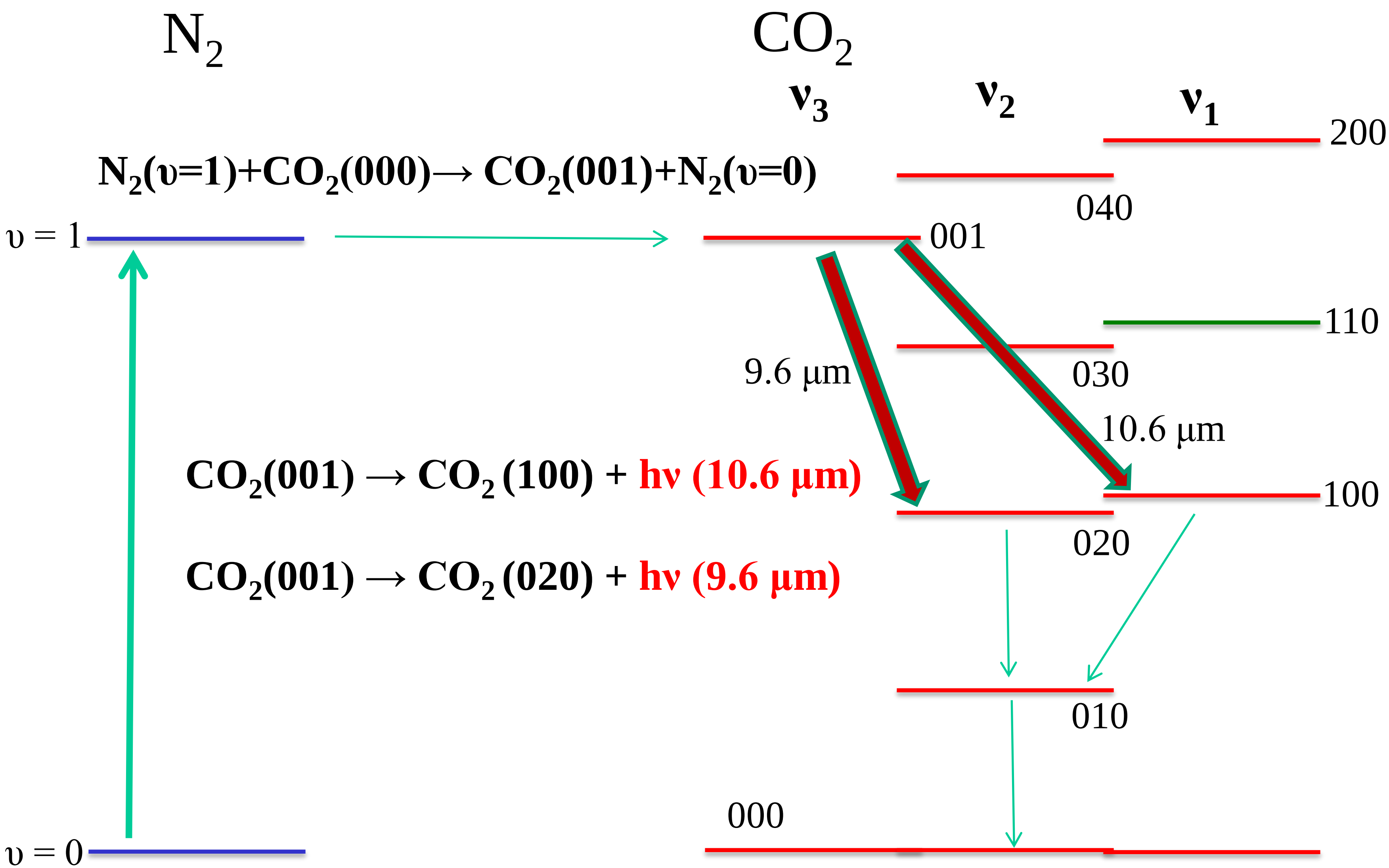
Αυθόρμητη αποδιέγερση (b) : $A^* \rightarrow A + h\nu$ A_{21}

Εξαναγκασμένη αποδιέγερση (c) : $A^* + h\nu \rightarrow A + 2h\nu$ B_{21}



Συντελεστές Einstein

Παράδειγμα : Το Λέιζερ Διοξειδίου του Άνθρακα (CO_2 laser)



$N_2(\upsilon=1)+CO_2(000)\rightarrow CO_2(001)+N_2(\upsilon=0)$

$CO_2(001) \rightarrow CO_2(100) + h\nu\ (10.6\ \mu m)$

$CO_2(001) \rightarrow CO_2(020) + h\nu\ (9.6\ \mu m)$

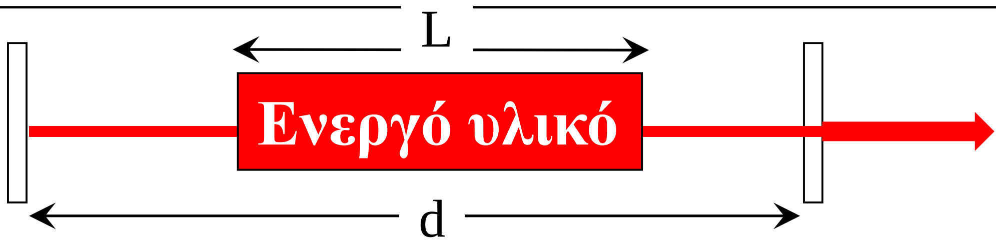
$N_2(\upsilon=0)+e^- \rightarrow N_2(\upsilon=1)$

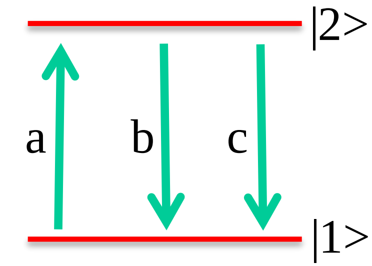
<u>Αναστροφή πληθυσμών</u>

$CO_2(001)$: αργή αποδιέγερση

$CO_2(100)$ και $CO_2(020)$: ταχεία αποδιέγερση

Αναστροφή πληθυσμού (Population inversion) ⇔ Ενίσχυση (Gain)





Νόμος Beer : $dI(x) = -I(x)adx \Rightarrow I = I_0 e^{-a2L}$ Για μία πλήρη διαδρομή στην κοιλότητα (0, 2d))

Αν α<0 (αρνητική (!) απορρόφηση) τότε έχουμε <u>ενίσχυση ακτινοβολίας</u> (gain) στην κοιλότητα

a, b, c : απλή κινητική θεώρηση του συστήματος δύο επιπέδων

$$\frac{dn}{dt} = -B_{12} nh\nu N_1 + B_{21} nh\nu N_2 + \cancel{A_{21} N_2} \Rightarrow \left(B_{12} = \sigma_{12}\frac{c}{h\nu},\ \ I = \rho c,\ \rho = nh\nu\right)$$

$$\frac{dn}{dt} h\nu = -\sigma_{12} I\left(N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2\right) \Rightarrow \frac{dI}{dx} = -\sigma_{12} I\left(N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2\right)$$

$$\sigma_{12}\left(N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2\right) = a \qquad\qquad a < 0 \Rightarrow N_2 > \frac{g_2}{g_1} N_1$$

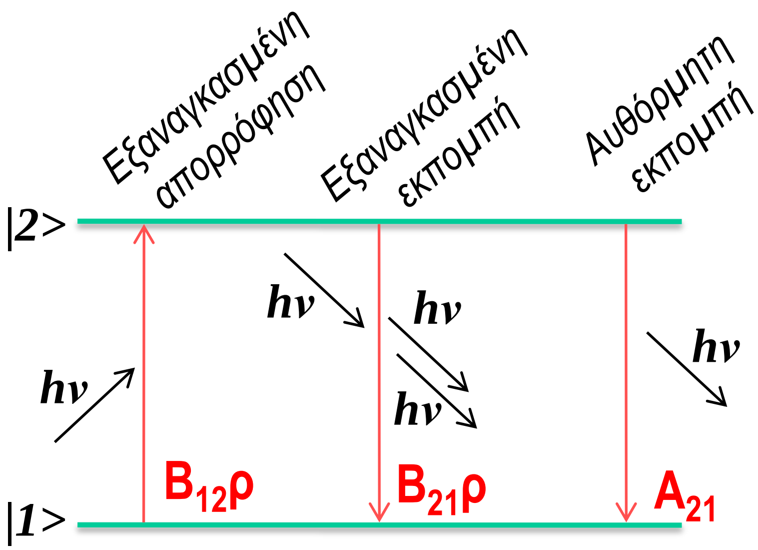
Για να ισχύει α < 0 απαιτείται $g_1N_2>g_2N_1$ δηλ. ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΠΛΗΘΥΣΜΩΝ

Θεωρώντας β (cm^{-1}), συντελεστή απωλειών εντός της κοιλότητας προκύπτει :

$$I_{0\to 2d} = I_0 e^{-a2L} \cdot e^{-\beta 2d} = I_0 e^{-a2L-\gamma} \Rightarrow a2L + \gamma < 0 \Rightarrow \Delta N_{threshold} = \frac{\gamma}{2L\sigma_{12}}$$

Δράση λέιζερ ευνοείται σε κοιλότητες με χαμηλές απώλειες, γ

Μεταβάσεις μεταξύ ενεργειακών επιπέδων (συντελεστές Einstein)



Συντελεστές Einstein : B_{12}, B_{21}, A_{21}

ρ = ρ(ν) : Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας

$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$

N_1, N_2 : πληθυσμοί (cm^{-3}) επιπέδων 1 και 2

Σε θερμική ισορροπία : $\rightarrow$ $$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow -B_{12}\rho N_1 + B_{21}\rho N_2 + A_{21}N_2 = 0$$

κατανομή Boltzmann : $\rightarrow$ $$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\Delta E/kT} = \frac{g_2}{g_1} e^{-h\nu/kT}$$

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21}N_2}{B_{12}N_1 - B_{21}N_2} = \frac{A_{21}/B_{21}}{(B_{12}/B_{21})(N_1/N_2) - 1} = \frac{A_{21}/B_{21}}{(B_{12}/B_{21})(g_1/g_2)e^{h\nu/kT} - 1}$$

Νόμος Planck $\rightarrow$

Νόμος Planck $$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3(e^{h\nu/kT} - 1)}$$

$$\boxed{A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21} \qquad B_{12} = \frac{g_2}{g_1} B_{21} = \frac{|\vec{\mu}_{12}|^2}{6\varepsilon_o \hbar^2}}$$

Κατευθυντικότητα (Directionality)

$$\Delta\Omega(steradians) \approx \frac{\lambda^2}{A} \approx (\Delta\theta)^2$$

Ως αποτέλεσμα των αλλεπάλληλων ανακλάσεων μεταξύ των κατόπτρων της κοιλότητας η ενισχυόμενη ακτινοβολία είναι εκείνη που διαδίδεται κατα μήκος του άξονα της κοιλότητας.

Κατα συνέπεια η προκύπτουσα δέσμη λέιζερ χαρακτηρίζεται από υψηλή κατευθυντικότητα (highly collimated beam) και ως εκ τούτου επιτρέπει τη διάδοση της ακτινοβολίας με ελάχιστη απόκλιση για ιδιάιτερα μεγάλες αποστάσεις.

Το αίτιο για την απόκλιση απο την ιδανική συγγραμμικότητα είναι η περίθλαση.

<u>Άσκηση</u>

Να προσδιορίσετε τη διατομή δέσμης λέιζερ, μήκους κύματος λ =500 nm, σε απόσταση 1 km από το λέιζερ αν στην έξοδο της κοιλότητας η διάμετρος της δέσμης είναι d_o=5 mm.

Μονοχρωματικότητα (Monochromaticity)

Αν και λόγω της αρχής της αβεβαιότητας δεν είναι εφικτό να παραχθεί ιδανικώς μονο-χρωματική ακτινοβολία, οι πηγές λέιζερ παράγουν υψηλής φασματικής «καθαρότητας» ακτινοβολία.
Στο ορατό, τυπικές τιμές συχνότητας είναι : $\nu \approx 5x10^{14}$ Hz
Τυπικό φασματικό εύρος λέιζερ : $\Delta\nu \approx 1x10^{2}$ Hz
Με ειδικές τεχνικές επιτυγχάνεται μέχρι $\Delta\nu \approx 1$ Hz

Μονοχρωματικότητα : $\Delta\nu/\nu \approx 2x10^{-13}$

Κεντρικό ρόλο στην επίτευξη υψηλής μονοχρωματικότητας παίζει το φάσμα ενίσχυσης του ενεργού υλικού για τη συγκεκριμένη μετάβαση λέιζερ (gain profile) και οι ρυθμοί της κοιλότητας.

<u>Άσκηση</u>
Να αναζητήσετε πληροφορίες για 2-3 εμπορικώς διαθέσιμα λέιζερ και να αναφέρετε τις προδιαγραφές τους όσον αφορά το φασματικό εύρος (bandwidth) της εκεπεμπόμενης ακτινοβολίας. Να υπολογίσετε χαρακτηριστικές τιμές $\Delta\nu/\nu$.

Διαμήκεις ρυθμοί (longitudinal modes) της κοιλότητας του λέιζερ

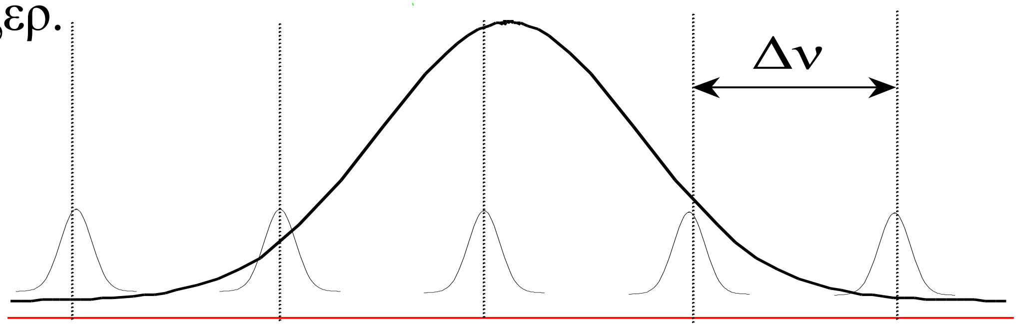
$$n\frac{\lambda}{2}=d \Rightarrow n\frac{c}{2\nu}=d \Rightarrow \nu=n\frac{c}{2d} \Rightarrow$$

$$\Delta\nu=\nu(n+1)-\nu(n)=\frac{c}{2d}$$

Π.χ. Εάν d = 15 cm τότε Δν = 10^9 Hz = 1 GHz

Η μετάβαση μεταξύ των (δύο) επιπέδων που εμπλέκονται στην δράση του λέιζερ έχει ένα **φασματικό εύρος (gain profile)** το οποίο προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά και τη συνολική διαπλάτυνση των δύο καταστάσεων.

Ο αριθμός των διαμήκων ρυθμών της κοιλότητας, που ενισχύονται και συνεισφέρουν στη δράση λέιζερ ευρίσκονται αναγκαστικά εντός του φασματικού εύρους της μετάπτωσης του λέιζερ.



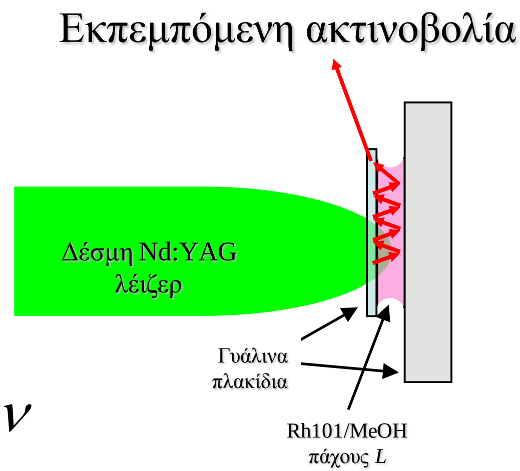
Διαμήκεις ρυθμοί (longitudinal modes) της κοιλότητας του λέιζερ

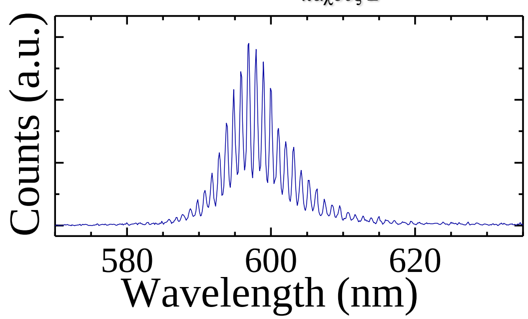
$$\Delta\nu = \frac{c}{2d}$$

$$\Delta\lambda \approx \frac{c\Delta\nu}{\nu^2} = \frac{\lambda^2}{c}\Delta\nu$$

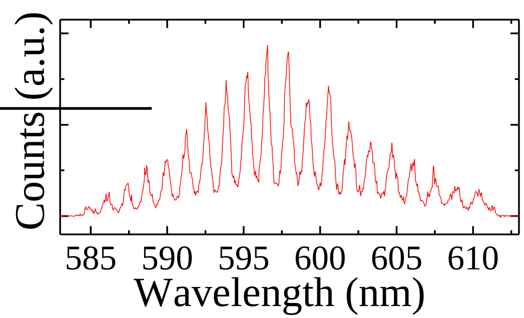
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d}$$

κοιλότητα ~0.1 mm



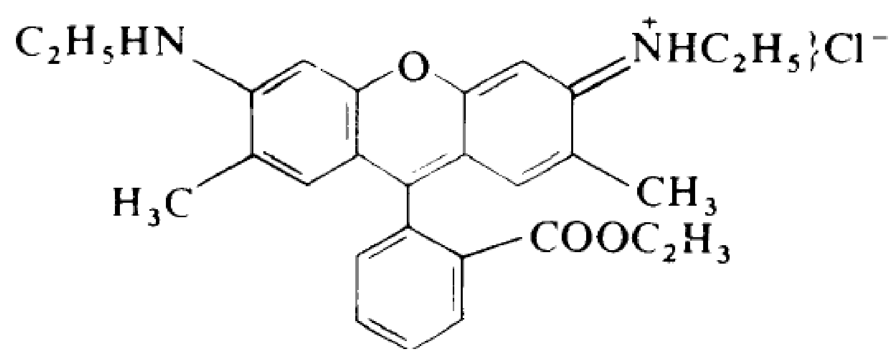


$\Delta\lambda = 1.37$ nm



Μεθανολικό διάλυμα της οργανικής χρωστικής R101 (Ροδαμίνη 101) τοποθετημένο μεταξύ 2 γυάλινων πλακιδίων (ισοδυναμεί με κυψελίδα οπτικού δρόμου ~ d) αντλείται με παλμικό λέιζερ Nd:YAG που εκπέμπει στα 532 nm με αποτέλεσμα να παρατηρείται δράση λέιζερ από τη χρωστική στην περιοχή των 600 nm με χαρακτηριστικούς διαμήκεις ρυθμούς με δλ = 1,37 nm.

Να προσδιορισθεί η αντίστοιχη τιμή του δν καθώς και η οπτική διαδρομή της κοιλότητας, d.



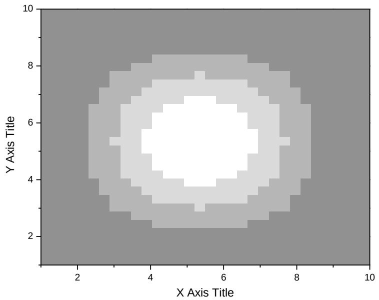
Εγκάρσιοι ρυθμοί (transverse modes) της κοιλότητας του λέιζερ

Η κοιλότητα του λέιζερ φαντάζει σαν ένα τρισδιάστατο πηγάδι (φρεάτιο)
Δύο από αυτές τις διαστάσεις είναι κάθετες στην διεύθυνση διάδοσης του φωτός και η κατανομή της έντασης περιγράφεται με τους ***εγκάρσιους τρόπους*** **(TEM_{ml})** όπου ***m*** και ***l*** είναι ο αριθμός των κομβικών επιπέδων στην κατακόρυφη και και οριζόντια διεύθυνση αντιστοίχως.
Οι λύσεις του διδιάστατου σωματιδίου σε φρεάτιο είναι γνωστές

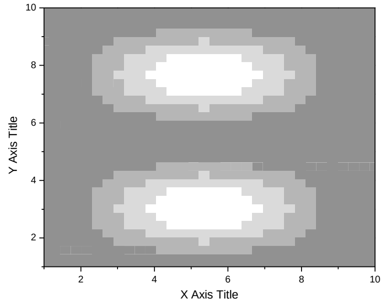
$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}}\sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right).$$

$$\Psi_{n_x n_y}(x, y) = \Psi_{n_x}(x)\Psi_{n_y}(y)$$

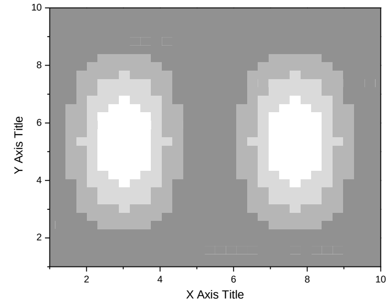
TEM_{00}



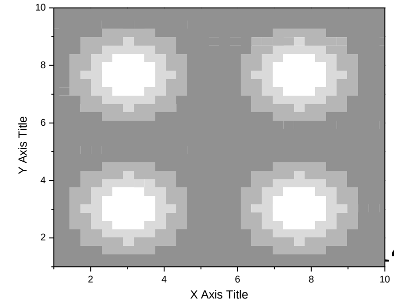
TEM_{01}



TEM_{10}



TEM_{11}



Συμφωνία (Coherence)

Η συμφωνία μιάς δέσμης λέιζερ υποδηλώνει το οτι τα κύματα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ευρίσκονται σε φάση.

Αλλά εξαιτίας του πεπερασμένου φασματικού εύρους Δν, οι διαφορετικού μήκους κύματος συνιστώσες της δέσμης λέιζερ τελικά καταλήγουν να ταλαντώνονται εκτός φάσης.

Προφανώς υψηλή μονοχρωματικότητα δέσμης συνεπάγεται υψηλή συμφωνία.

Χρονική συμφωνία : Ο χρόνος, τ_c , ό οποίος μεσολαβεί έτσι ώστε δύο Η/Μ κύματα με διαφορά συχνότητας Δν να έλθουν εκτός φάσης κατα ένα πλήρη κύκλο.

Χρόνος συμφωνίας (coherence time) : $\boldsymbol{\tau_c = 1/\Delta\nu}$

Η χρονική συμφωνία εκφράζεται και με βάση το:

Μήκος συμφωνίας (coherence length) : $\boldsymbol{\ell_c = \lambda^2/\Delta\lambda}$

Χωρική συμφωνία (spatial coherence) : Εκφράζει τη συμφωνία σε μιά κάθετη διατομή της δέσμης.

<u>Άσκηση</u>

Να υπολογίσετε το μήκος συμφωνίας της κίτρινης γραμμής του Na, θεωρώντας διαπλάτυνση Doppler και να το συγκρίνετε με το αντίστοιχο ενός λέιζερ He-Ne.

Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας λέιζερ

Λαμπρότητα (Brightness), Ισχύς (Power), Ενέργεια (Energy)

Ισχύς ακτινοβολίας (Radiant Power): P (W)

Radiance : $L = P / A\,\Delta\Omega$ (W/cm^2 sr) A : διατομή πηγής

Πυκνότητα ενέργειας (Radiant energy density) : ρ (J/m^3)

Φασματική πυκνότητα ισχύος (Spectral power density): $P(\nu)$ (W/Hz)

Λαμπρότητα (Brightness) : $\beta_\nu = P(\nu) / A\,\Delta\Omega\,\Delta\nu$ (W/cm^2 sr Hz)

Φασματική ένταση (Intensity) : $I(\nu) = P(\nu) / A\,\Delta\nu$ (W/cm^2 Hz)

Ηλιος : $\beta(580\ nm;\ 5800\ K) \approx 1{,}5 \times 10^{-12}\ W/cm^2\ sr\ Hz$

Λέιζερ He-Ne, P=1 mW $\beta(632{,}8\ nm;\ \Delta\nu = 1 \times 10^4\ Hz) \approx 25\ W/cm^2\ sr\ Hz$

Ενέργεια παλμού λέιζερ (pulse energy) : $E = \int P(t)dt$ (J)

Ισχύς παλμού (Peak power) : $P = E/\Delta\tau$ $\Delta\tau$: χρονικό έυρος παλμού (FWHM)

Ροή ισχύος (Irradiance, Power density) : $I = P/A$

Ροή ενέργειας (Energy density) : $F = E/A$

A : διατομή ακτινοβολούμενης επιφάνειας

Άσκηση
Να επιβεβαιώσετε το αποτέλεσμα των ανωτέρω υπολογισμών των τιμών βν.

Τύποι λέιζερ

* Αερίων (Gas lasers)
* Υγρών /χρωστικές (Dye lasers)
* Στερεάς κατάστασης (Solid state lasers)
* Ημιαγωγών (Semiconductor diode lasers)
* Χημικά laser (Chemical lasers)
* Χρωματικών κέντρων (Color center lasers)
* Ελευθέρων ηλεκτρονίων (Free-electron laser)

Εργαστηρική Ασφάλεια κατα τη χρήση Λέιζερ

Στο τέλος των διαφανειών παρατίθεται παράρτημα στο οποίο αναφέρονται θέματα και κανόνες ασφαλούς χρήσης λέιζερ

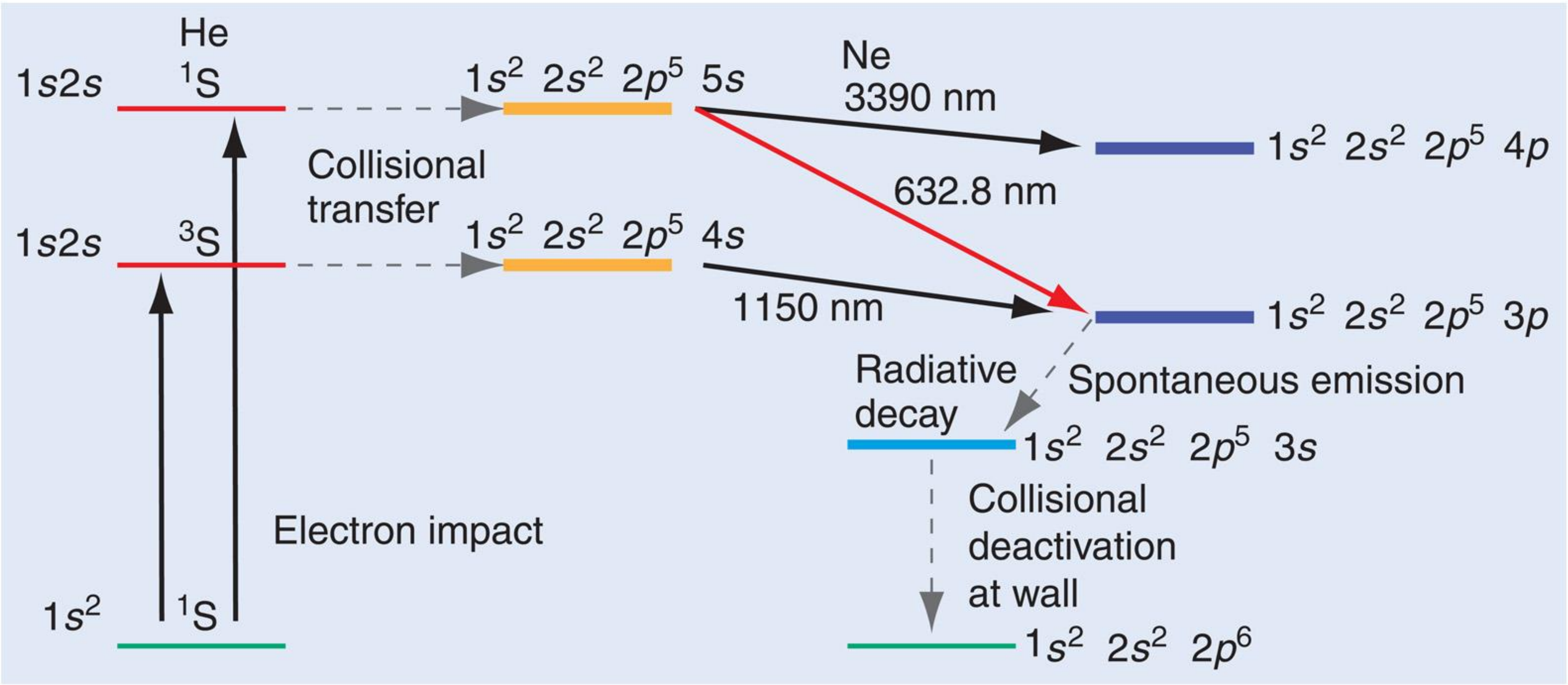
Ενεργό υλικό	ΤύποςΚατηγορία	Μήκος κύματος
F_2	Gas	157 nm
ArF	Excimer	193 nm
KrF	Excimer	248 nm
XeCl	Excimer	308 nm
N_2	Gas	337 nm
Organic dyes	Dye lasers	320 -1000 nm (tunable)
He-Cd	Gas	325, 42 nm
Ar^+ (Argon ion)	Gas	275-303, 330-360, 477, 514 nm
Kr^+ (Krypton ion)	Gas	
He-Ne	Gas	543, 632.8, 1150 nm
GaAlInP family	Semiconductor	630-680 nm
Ti:Sapphire	Solid state	680-1130 nm (tunable)
Ruby : Cr^{3+}:Al_2O_3	Solid state	694 nm
Alexandrite	Solid state	720-800 nm (tunable)
GaAlAs family	Semiconductor	750-900 nm
Nd:YAG (YAG : $Y_3Al_5O_{12}$)	Solid state	1064 nm (harmonics: 532, 355, 266, 213 nm
InGaAsP family	Semiconductor	1.2-1.6 μm
HF	Gas	2.6-3.0 μm
CO	Gas	5 - 6 μm
CO_2	Gas	9.6, 10.6 μm

Ταξινόμηση λέιζερ με βάση την ισχύ ακτινοβολίας εξόδου

- **CLASS 1** — <0.4 mW cw
  «ακίνδυνο» αν δεν αποσυναρμολογηθεί !!!
  CD, DVD (40mW!!!)
- **CLASS 2** — < 1 mW cw, ορατή ακτινοβολία
  επικίνδυνο υπό συνθήκες συνεχούς έκθεσης
- **CLASS 2α** — < 1 mW cw, ορατή ακτινοβολία
  επικίνδυνο υπό συνθήκες εστίασης
  super-market scanners
- **CLASS 3a** — 1 – 5 mW cw
  επικίνδυνο υπό συνθήκες συνεχούς έκθεσης
  δείκτες laser
- **CLASS 3b** — 5- 500 mW cw
  υψηλής επικινδυνότητας, καμμιά άμεση έκθεση
  εργαστηριακά, ερευνητικά laser
- **CLASS 4** — Παλμικά και συνεχή (>500 mW)
  υψηλής επικινδυνότητας
  εργαστηριακά, ερευνητικά, ιατρικά, στρατιωτικά laser

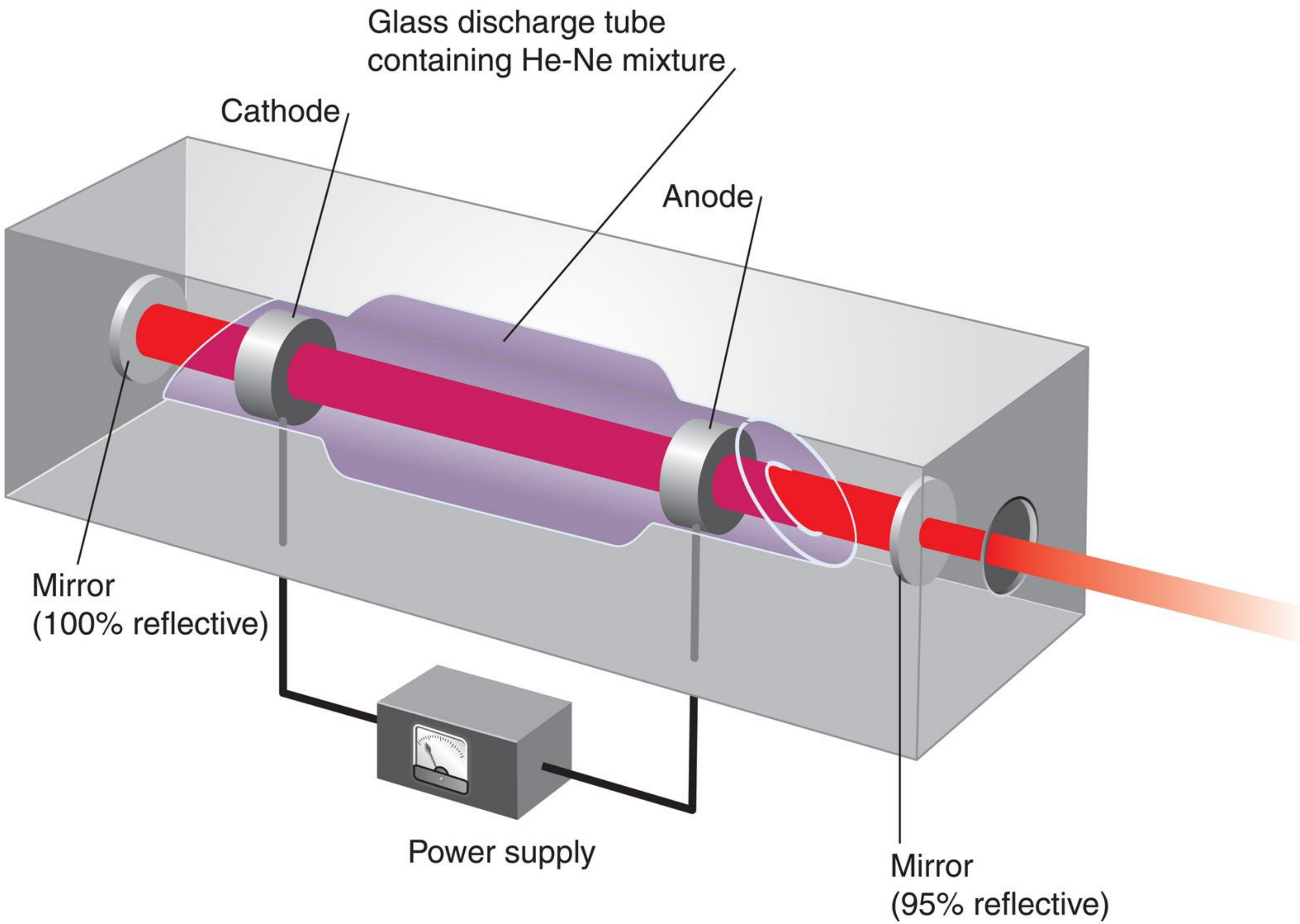
(1) ***He–Ne*** (λέιζερ αερίων ουδέτερων ατόμων), συνεχής λειτουργία

λ : 3.39 μm, **632.8nm**, 1.15μm, Ισχύς < 1mW μέχρι δεκάδες mW



(1) ***He–Ne*** (λέιζερ αερίων ουδέτερων ατόμων), συνεχής λειτουργία

λ : 3.38 μm, **632.8nm**, 1.15μm, Ισχύς < 1mW μέχρι δεκάδες mW



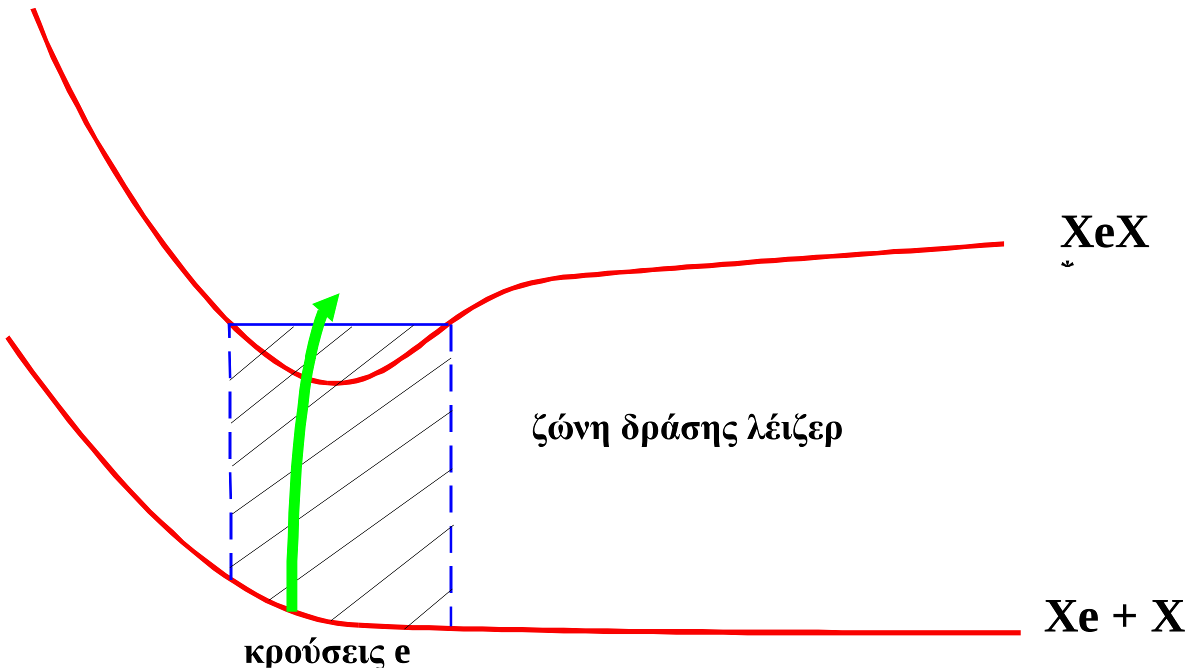
(2) *Excimer lasers* *(Διεγερμένων διμερών)*

ArF (193nm), KrF (248nm), XeCl (308nm), XeF (351nm)

Παλμική λειτουργία ~10ns, μερικά J

Άντληση κοιλότητας με ηλεκτρική εκκένωση

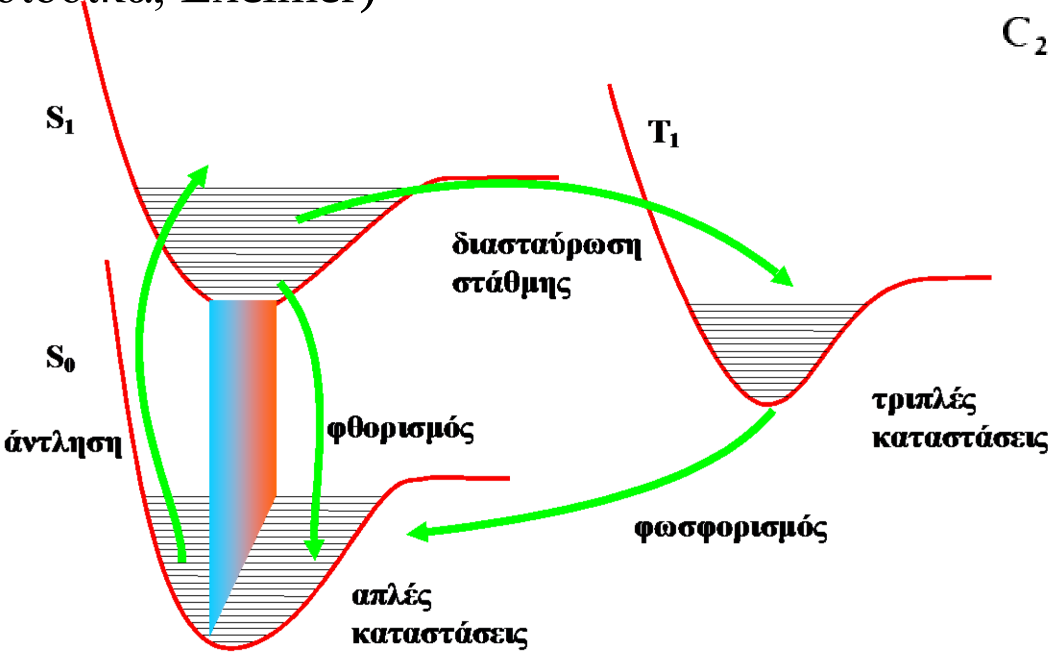
Τα ευγενή αέρια έχουν κλειστές στοιβάδες στην βασική ηλεκτρονική κατάσταση. Όταν όμως διεγερθούν μοιάζουν με αλκάλια και έτσι μπορούν να δημιουργήσουν σταθερούς δεσμούς με άτομα αλογόνων.

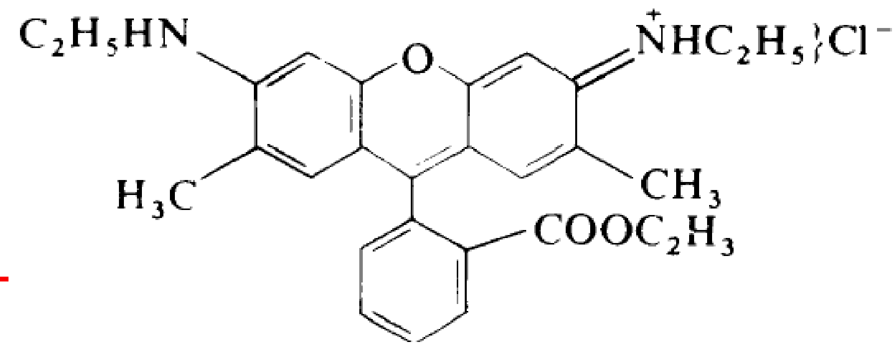


(3) **Λέιζερ οργανικών χρωστικών** (dye lasers)

Πολυμεθινικές χρωστικές 0.7 - 1μm, ξανθένια 0.5 - 0.7μm, κουμαρίνες 0.4 - 0.5μm σε διαλύματα μεθανόλης, DMSO, διοξάνιου σε συνεχή κυκλοφορία του διαλύματος

Οπτική άντληση με λυχνίες τόξου, εκκένωσης, άλλα λέιζερ (Ar+, Kr+, Nd:YAG, διοδικά, Excimer)





Πλεονέκτημα

Λειτουργία σε πολλά μήκη κύματος επιλεκτικότητα (tunability) ή παραγωγή χρονικά στενών παλμών

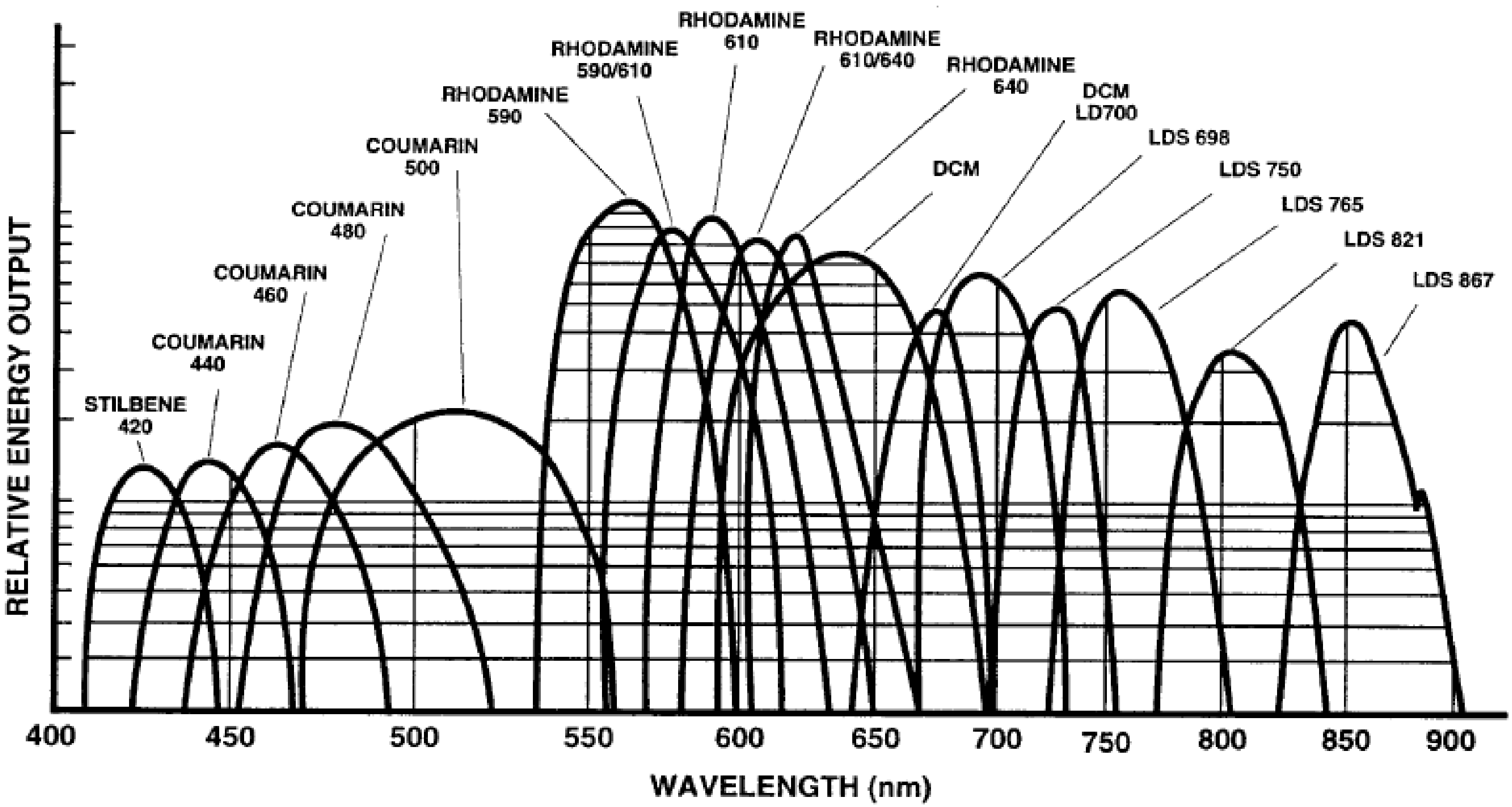
Μειονεκτήματα

Σχετικά μικρός χρόνος ζωής, περιορισμένο εύρος επιλεκτικότητας ανά χρωστική

(3) **Λέιζερ οργανικών χρωστικών** (dye lasers)

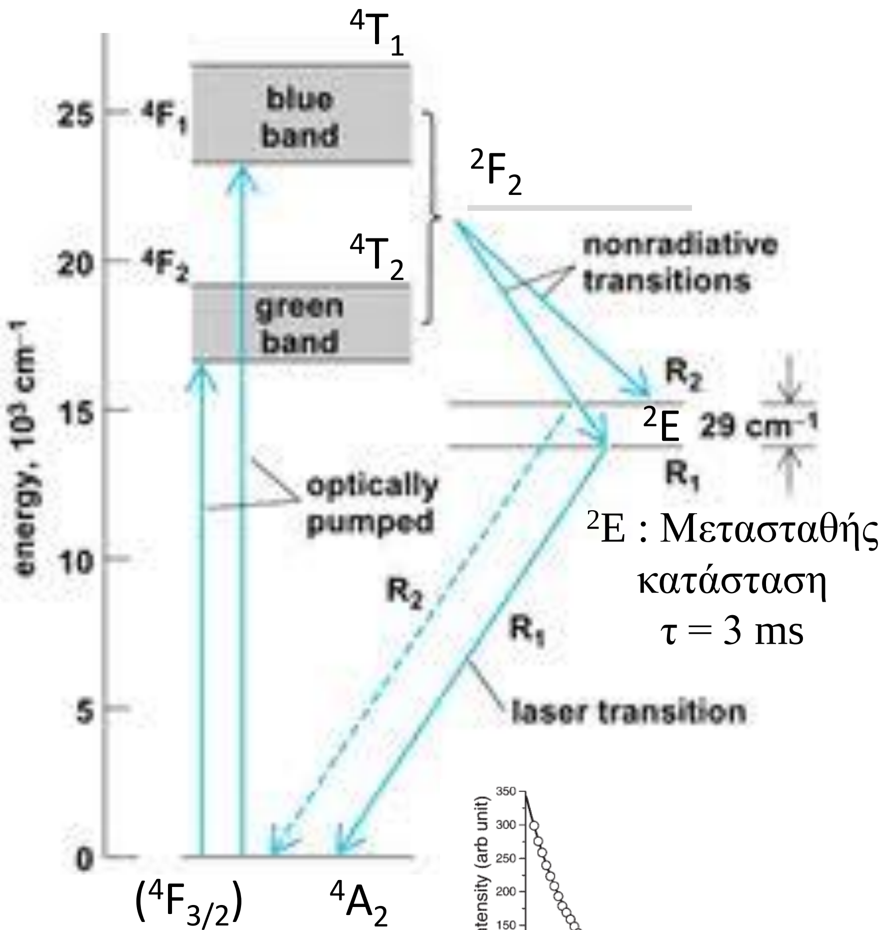
TUNING CURVES

Nd:YAG PUMPED LASER DYES (Continuum)[53]



(4) Λέιζερ στερεάς κατάστασης

Ruby $Cr^{+3}:Al_2O_3$



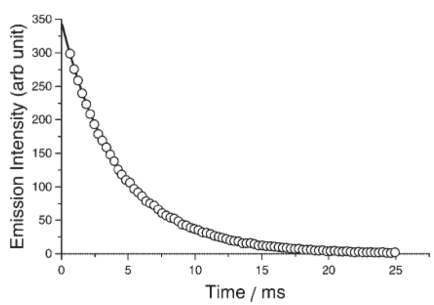


Figure 3. Radiative decay of the ^2E state. Emission wavelength 694.2 nm. Circles indicate experimental points (1/10 of the total number), whereas the continuous line corresponds to the fitted mono-exponential decay function.

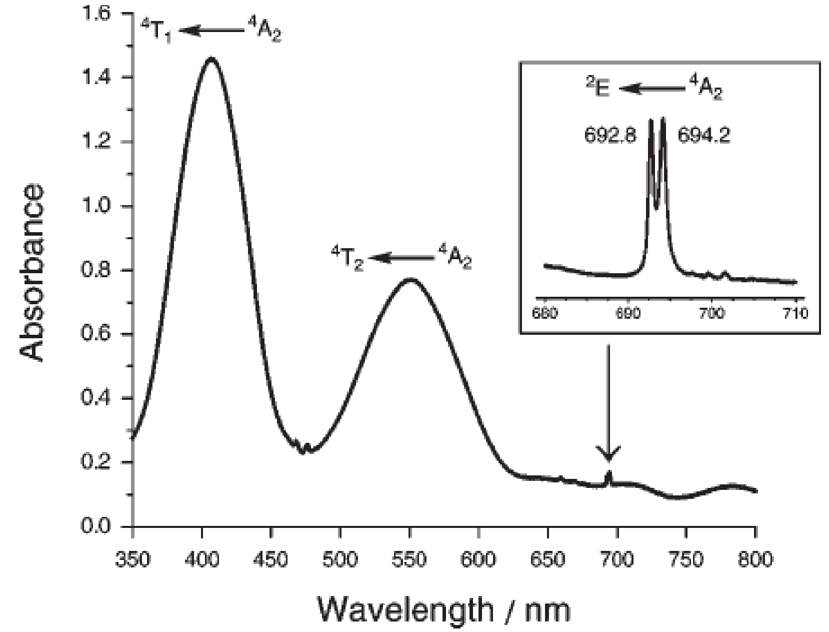


Figure 1. The absorption spectrum of ruby in the visible region.

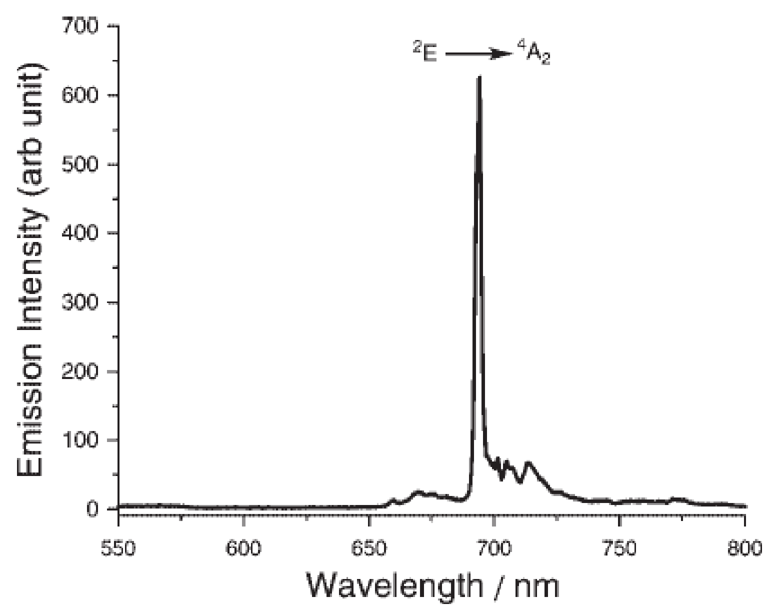
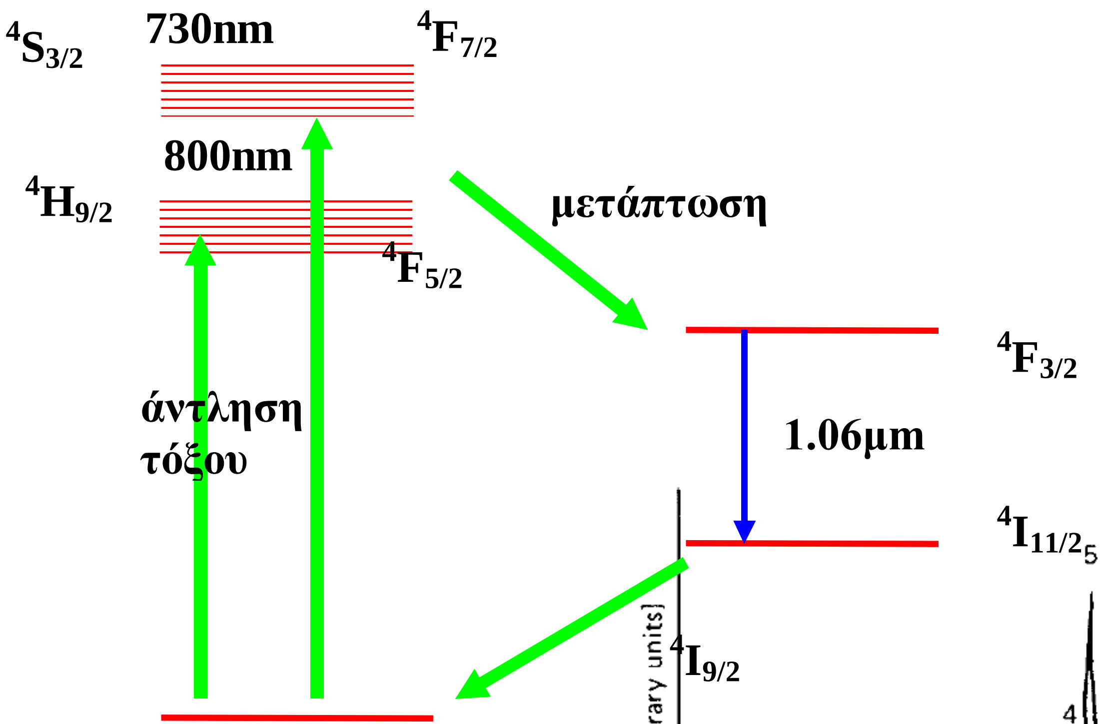
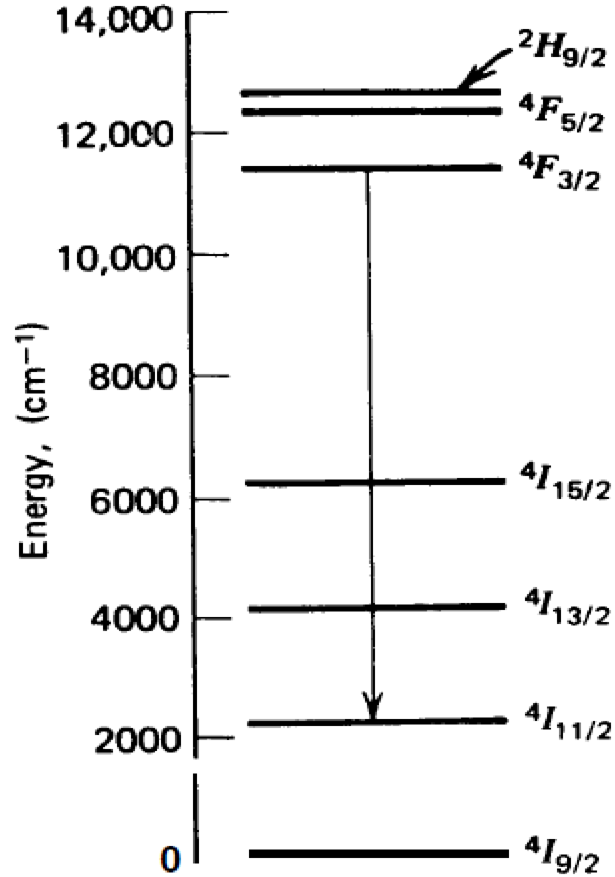


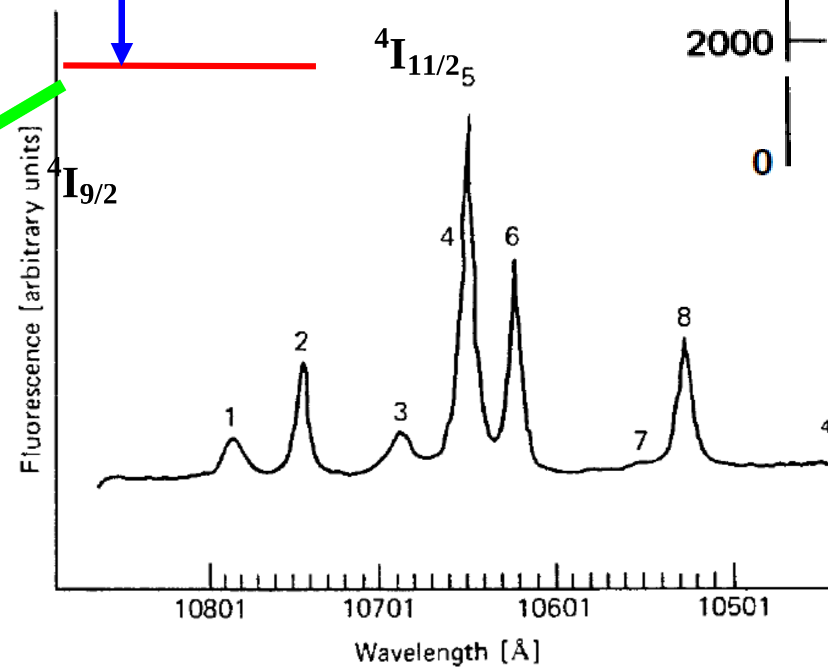
Figure 2. The fluorescence spectrum of ruby. Excitation wavelength is 407 nm.

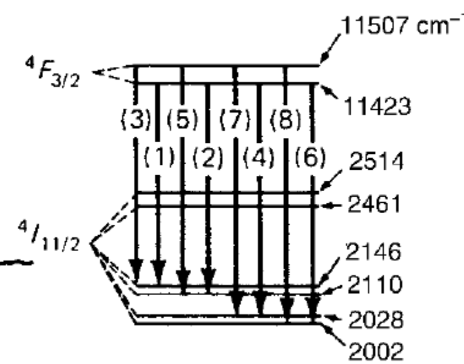
(4) Λέιζερ στερεάς κατάστασης

Nd^{+3} :YAG





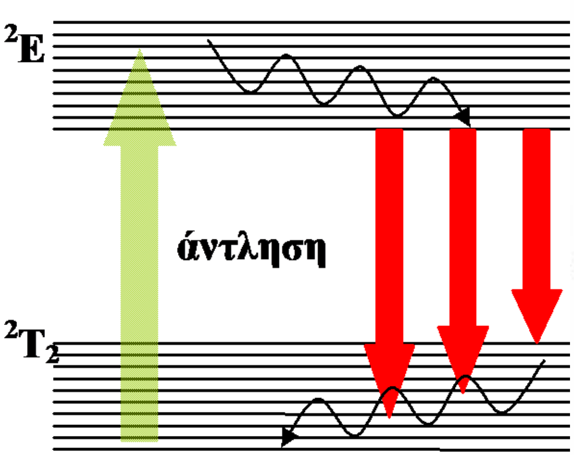


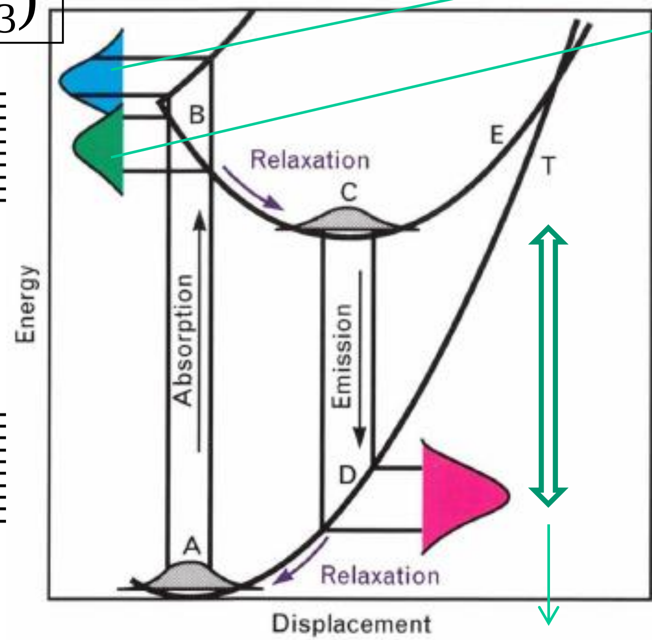


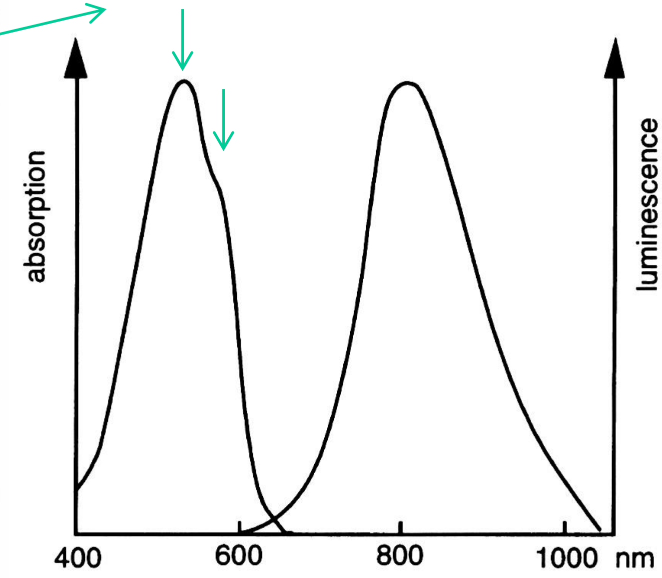
(4) Λέιζερ στερεάς κατάστασης

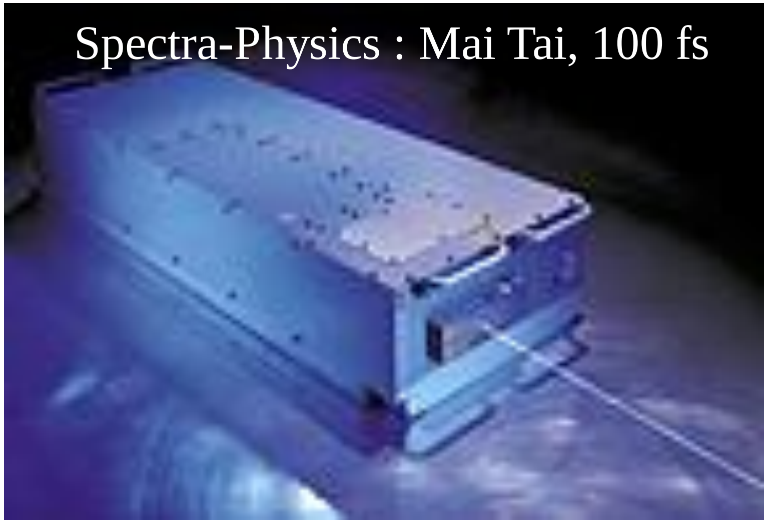
Διάσχιση της ^2E λόγω φαινομένου Jahn-Teller

Ti^{+3} sapphire (Al_2O_3)





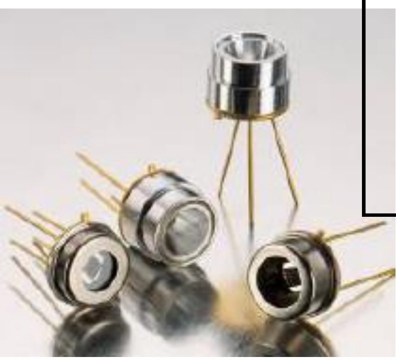


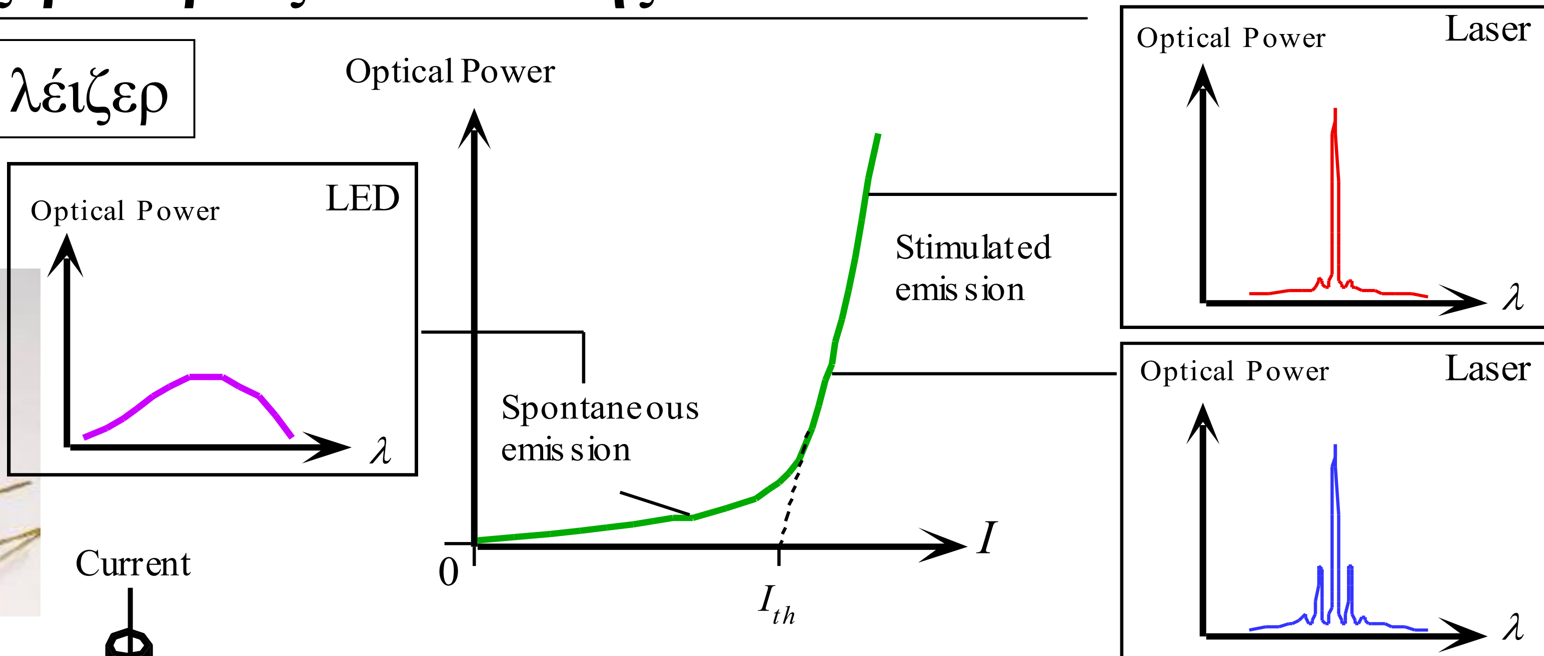

Spectra-Physics : Mai Tai, 100 fs

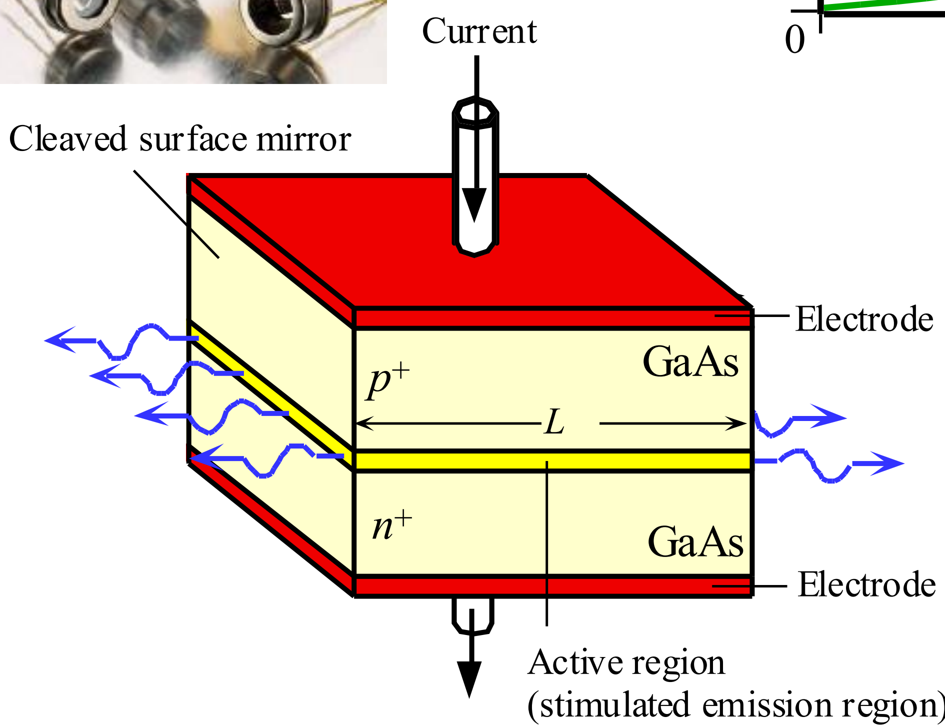
1. Ευνοείται η αναστροφή πληθυσμών διότι η αποδιέγερση οδηγεί σε δονητικώς διεγερμένο επίπεδο της θεμελιώδους ^2T και κατά συνέπεια μη πληθυσμένο.
2. Το φασματικό εύρος της εκπομπής του $Ti:Al_2O_3$ επιτρέπει εκπομπή λέιζερ σε ευρεία περιοχή: 660-1180 nm, κατ' αναλογία με τα λέιζερ οργανικών χρωστικών.

(4) Λέιζερ στερεάς κατάστασης

Διοδικά λέιζερ







http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode

<u>Αρχή λειτουργίας</u>

Διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος έντασης μεγαλύτερης μιάς τιμής κατωφλίου (I_{th}) μέσω του ημιαγωγού οδηγεί σε εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας ως αποτέλεσμα του υψηλού ρυθμού της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων οπών.

<u>Πλεονεκτήματα - Εφαρμογές</u>

Το πολύ μικρό μέγεθος των διοδικών λέιζερ και η μαζική παραγωγή ελαχιστοποιούν το κόστος και επιτρέπουν τη χρήση σε πληθώρα ηλεκονικών συσκευών (CD, DVD κ. ά.)

Εφαρμογές σε περιβαλλοντικές μετρήσεις αερίων ρύπων.

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΩΝ

Τμήμα Χημείας
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εργαστήριο Λέιζερ
ΙΗΔΛ – ΙΤΕ

Δ. Άγγλος

Εικόνα οφθαλμικού τραυματισμού από ακτινοβολία παλμικού λέιζερ

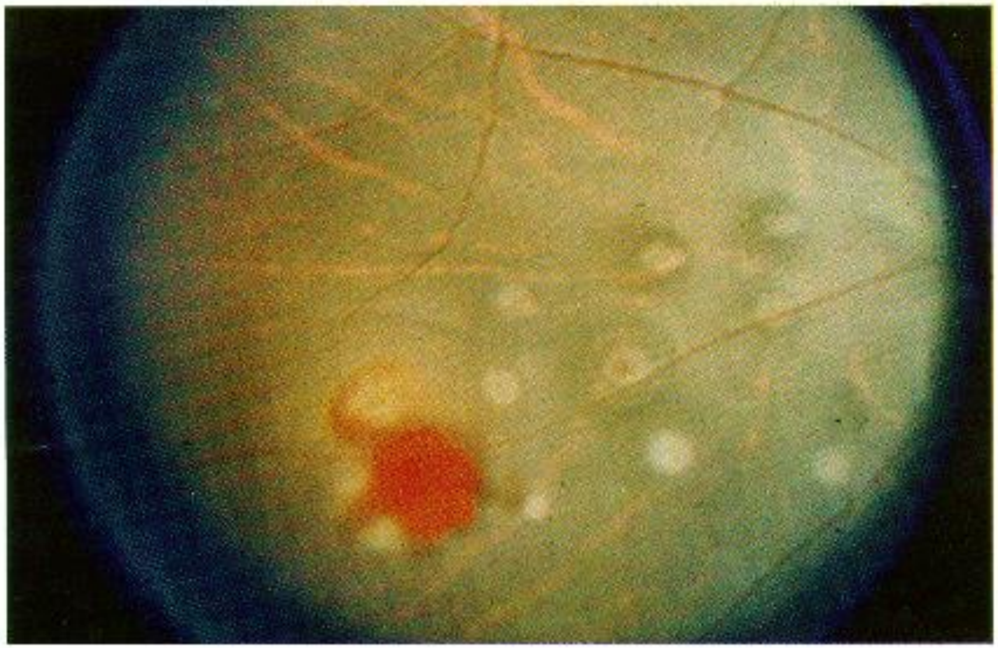


Figure 7. Multiple small laser burns with minimal hemorrhage.

http://www.adtdl.army.mil/cgi-bin/atdl.dll/fm/8-50/INTRO.htm

Ερώτηση

Figure 7. Multiple small laser burns with minimal hemorrhage.

http://www.adtdl.army.mil/cgi-bin/atdl.dll/fm/8-50/INTRO.htm

255: Beam blinds scientist doing alignment of a Nd:YAG laser

During optics alignment involving a 30 mJ pulsed Nd:YAG laser (10 Hz) on a target using a prism, the beam exceeded the prism's critical angle and struck the scientist in the eye resulting in a permanent retinal burn.

Unfortunately, no protective eyewear was worn at the time.

An ophthalmologist was consulted and confirmed retinal burns.
Blurry vision resulted especially when reading.

http://www.rli.com/accident/case_studies/

1st TAKE Safety ACTION

Incident ALERT Message from Performance Surety

FOR DETAILS:

- **Occurrence Report:** ALO-LA-LANL-CHEMLASER-2004-0001
- **PS-7 Occurrence Investigators:** Matt Hardy, 667-6335 Rita Henins, 665-6981

An additional alert about this event will follow if the investigation reveals details that indicate an unknown hazard exists for other employees involved in this type of activity. For more information about "1st Take," please call LANL PS-7 at 665-0033.

August 18, 2004
LANL CHEMLASER 2004-0010

Student sustains laser eye injury

On July 14, 2004, an undergraduate student employed by another government agency was injured while performing work with a Class IV neodymium (Nd): YAG laser at Los Alamos National Laboratory. The student came to the Laboratory to work with a LANL scientist investigating the potential use of lasers in studying the composition of comets.

The scientist and student had set up a laser experiment designed to suspend and then analyze particles inside a vacuum target chamber using an unusual configuration that was neither described nor analyzed in work control documents. The experiment used a Particle Generating (PG) laser to suspend the particles and the (Nd:YAG) Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) laser to vaporize the suspended particles. The PG laser was aligned vertically to allow the beam to enter through the top of the target chamber, the LIBS laser was aligned horizontally to allow the beam to enter through a side window. The scientist energized both laser power supplies and was operating the LIBS laser with the Q switch trigger cable disconnected (a mode the scientist believed did not allow the LIBS laser to produce a laser beam). With the Q switch disabled and the LIBS laser's flashlamps operating, the scientist believed that only white light exited the laser's optical tube and traveled down the laser beam path. The scientist wanted to demonstrate that the PG laser could suspend particles from the sample and intended to use the light from the LIBS laser to illuminate the suspended particles and make them visible inside the target chamber.

The scientist fired and secured the PG laser and then observed the suspended particles illuminated by the LIBS laser inside the target chamber. He told the student he could see suspended particles and invited the student to take a look. As the student bent down to look into the chamber, she saw a flash and subsequently noted a reddish brown substance floating in her left eye. Neither the scientist nor the student were wearing laser eye protection. The student was taken to LANL's occupational health facility (HSR-2) and was referred to several eye specialists. Laser eye damage was confirmed. The student continues to experience loss of central vision in her left eye.

Laser operations were suspended and the LANL Director assembled a team to investigate the accident, determine the causal factors, and make recommendations.

Experimental setup showing the target chamber and the LIBS laser

Re-creation of target viewing position

Initial Analysis

The investigation is nearing completion and formal findings will be made available in a few weeks after corrective actions are developed and incorporated. Lines of inquiry have included the use of personal protective equipment, the mentoring and supervision of students, management oversight and control of work/workers, and the reporting and notification process for abnormal events. Laboratory measurements were made to characterize the conditions and configuration believed to have existed when the accident occurred. Measurements indicated that the student could not have received a laser eye injury under these conditions because the LIBS laser did not emit a beam in this configuration. Consequently, the team is evaluating if other configurations could have resulted in the accident.

Initial Recommendations

Management Level: Managers should:

- Ensure that required safety practices are implemented in the workplace;
- Ensure training requirements are completed before authorizing work;
- Ensure that personal protective equipment is used;
- Ensure laser personnel complete a baseline eye examination;
- Ensure changes to work and associated changes in work configuration are authorized, and that these changes are addressed in work control documents; and
- Provide LANL employees with this "1st Take," either through Nested Safety meetings or required reading programs.

Worker Level: Workers should:

- Know the hazards of their experiment;
- Wear specified laser eye protection as required;
- Challenge unsafe or questionable behavior, and if you're not sure, *ask*;
- Use interlocks as designed; and
- Prevent eye exposure to direct or scattered radiation from a Class IV laser.

More information will be provided to employees in the "Final Take" alert message from Performance Surety.

GUIDANCE: Resources at hand

For more information related to laser safety you can refer to:

- Lasers LIR 402-400-01.3
- Laser Safety: Class 3b or 4 Self Study Course No. 17817
- American National Standards Institute Z136.1 (Safe Use of Lasers)
- Lessons Learned: Operational Experience Summaries, 2nd Quarter - 2004 (http://www.eh.doe.gov/paa)
- Occurrence Report: ALO-LA-LANL-CHEMLASER-2004-001
- Occurrence Report OAK-LBL-MSD-2003-0001
- Occurrence Report ALO-LA-LANL-FIRNGHELAB-1999-0002
- Occurrence Report ALO-LA-LANL-FIRNGHELAB-1998-0002

Experimental setup showing the target chamber and the LIBS laser

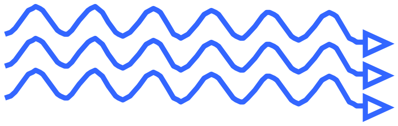
Re-creation of target viewing position

ΑΣΦΑΛΕΙΑ LASER

- Είδη και χαρακτηριστικά πηγών λέιζερ
- Κίνδυνοι από τη χρήση λέιζερ
- Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας λέιζερ με βιολογικούς ιστούς
- Πρόληψη - Προστασία

ΕΙΔΗ LASER

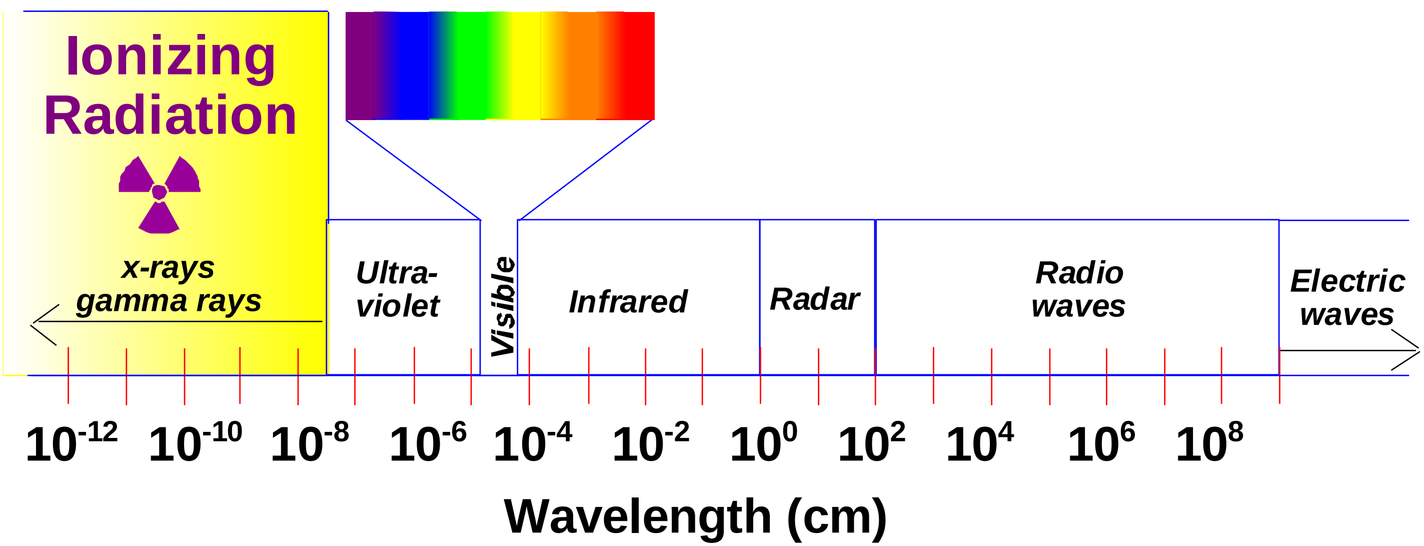
- Στερεάς κατάστασης (Solid state)
- Αερίου (Gas lasers)
- Διεγερμένων διμερών (Excimer)
- Οργανικών χρωστικών (Dye lasers)
- Ημιαγωγών (Diode lasers)



Συμφωνία,
Μονοχρωματικότητα,
Κατευθυντικότητα

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ LASER

- Μήκος κύματος εκπομπής (UV, Visible, IR)
- Ισχύς/Ενέργεια εξόδου (mW-W, nJ-kJ)
- Χρονοδιάρκεια παλμού (cw, ns, ps, fs)



ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER

Φασματικές περιοχές

Band		**Wavelength**
Ultraviolet (UV)	**UV-C**	**200 – 280 nm**
	UV-B	**280 – 315 nm**
	UV-A	**315 – 400 nm**
Visible (VIS)		**400 – 700 nm**
Infrared (IR)	**IR-A**	**700 – 1400 nm**
	IR-B	**1400 – 3000 nm**
	IR-C	**3000 – 1 mm**

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ LASER

- **CLASS 1** <0.4 mW cw
  «ακίνδυνο» αν δεν αποσυναρμολογηθεί !!!
  CD, DVD (40mW!!!)
- **CLASS 2** < 1 mW cw, ορατή ακτινοβολία
  επικίνδυνο υπό συνθήκες συνεχούς έκθεσης
- **CLASS 2a** < 1 mW cw, ορατή ακτινοβολία
  επικίνδυνο υπό συνθήκες εστίασης
  super-market scanners
- **CLASS 3a** 1 – 5 mW cw
  επικίνδυνο υπό συνθήκες συνεχούς έκθεσης
  δείκτες laser
- **CLASS 3b** 5- 500 mW cw
  υψηλής επικινδυνότητας, καμμιά άμεση έκθεση
  εργαστηριακά, ερευνητικά laser
- **CLASS 4** Παλμικά και συνεχή (>500 mW)
  υψηλής επικινδυνότητας
  εργαστηριακά, ερευνητικά, ιατρικά, στρατιωτικά laser

Class 1 Lasers

Class 1 lasers do not emit harmful levels of radiation .

Class 2 Lasers (< 1mW, commonly found in alignment applications)

Capable of creating eye damage through chronic exposure. In general, the human eye will blink within 0.25 second when exposed to Class 2 laser light, providing adequate protection. It is possible to stare into a Class 2 laser long enough to cause damage to the eye.

Class 2a Lasers (special purpose < 1mW, e.g. barcode readers)

Class 3a Lasers (1-5 mW)

Not hazardous when viewed momentarily with the naked eye, but they pose severe eye hazards when viewed through optical instruments (e.g., microscopes and binoculars).

Class 3b Lasers (5-500 mW or less than 10 J/cm^2 for a ¼-s pulsed system)

Injury upon direct viewing of the beam and specular reflections. Specific control measures must be implemented.

Class 4 Lasers (> 500 mW or greater than 10 J/cm^2 for a ¼-s pulsed system)

They pose eye hazards, skin hazards, and fire hazards. Viewing of the beam and of specular reflections or exposure to diffuse reflections can cause eye and skin injuries. All control measures to be outlined must be implemented.

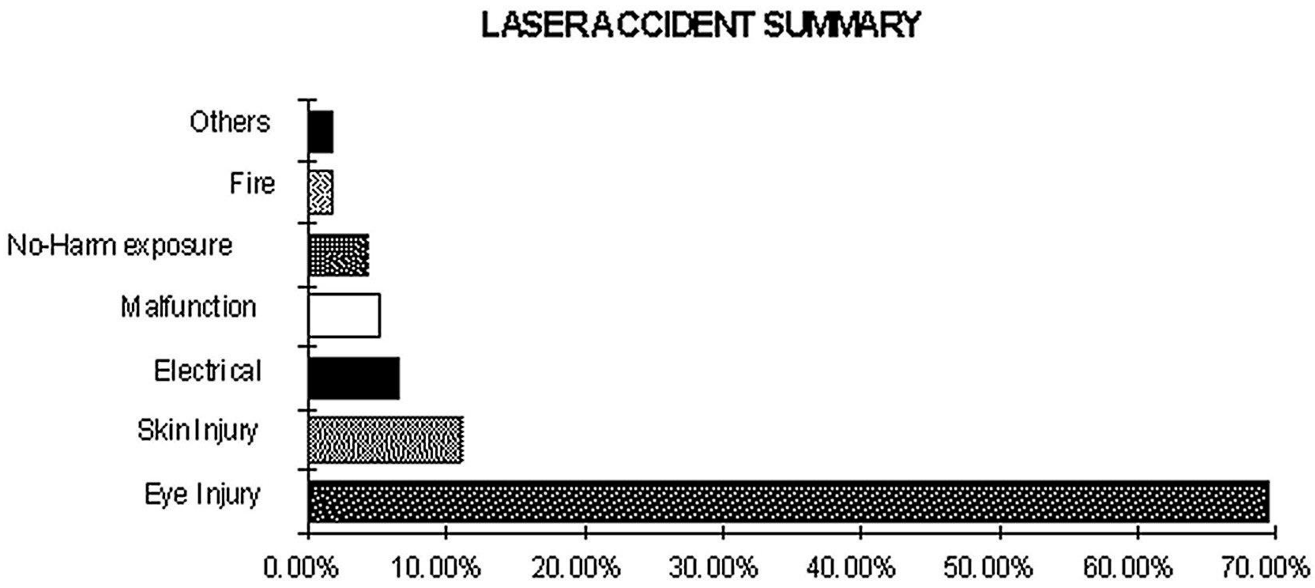
ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER

- **Ακτινοβολία Laser**
  - οφθαλμικός τραυματισμός, βλάβη
  - επιδερμικές βλάβες (εγκαύματα)

- **Άλλα αίτια**
  - ηλεκτρική τροφοδοσία
  - τοξικά χημικά, διαλύτες (dye lasers)
  - τοξικά αέρια (excimer lasers)
  - φωτιά
  - δευτερεύουσα ακτινοβολία
  - ακτινοβολία πλάσμα
  - υπερβολικός θόρυβος

ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER (1)

Περιστατικά ατυχημάτων λέιζερ (ΗΠΑ, 1964-1992)

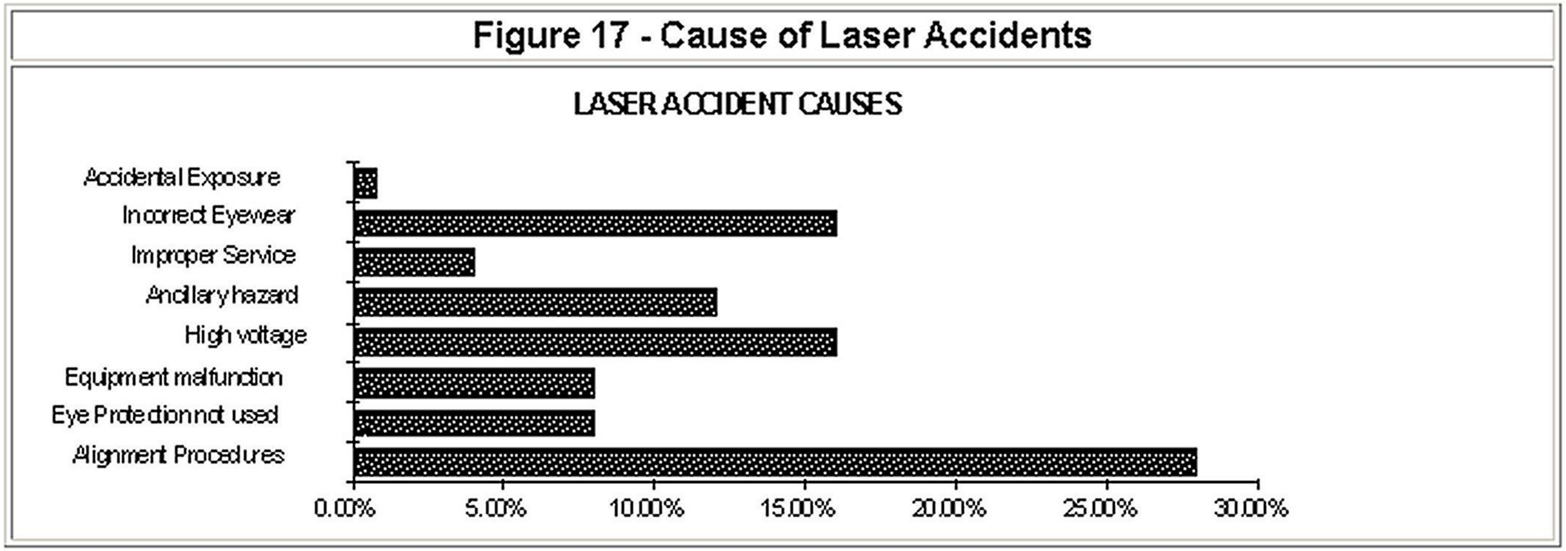


Στην πλειοψηφία τους τα ατυχήματα περιλαμβάνουν τραυματισμούς στο μάτι

http://www.adm.uwaterloo.ca/infohs/lasermanual/documents/section11.html

ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER (2)

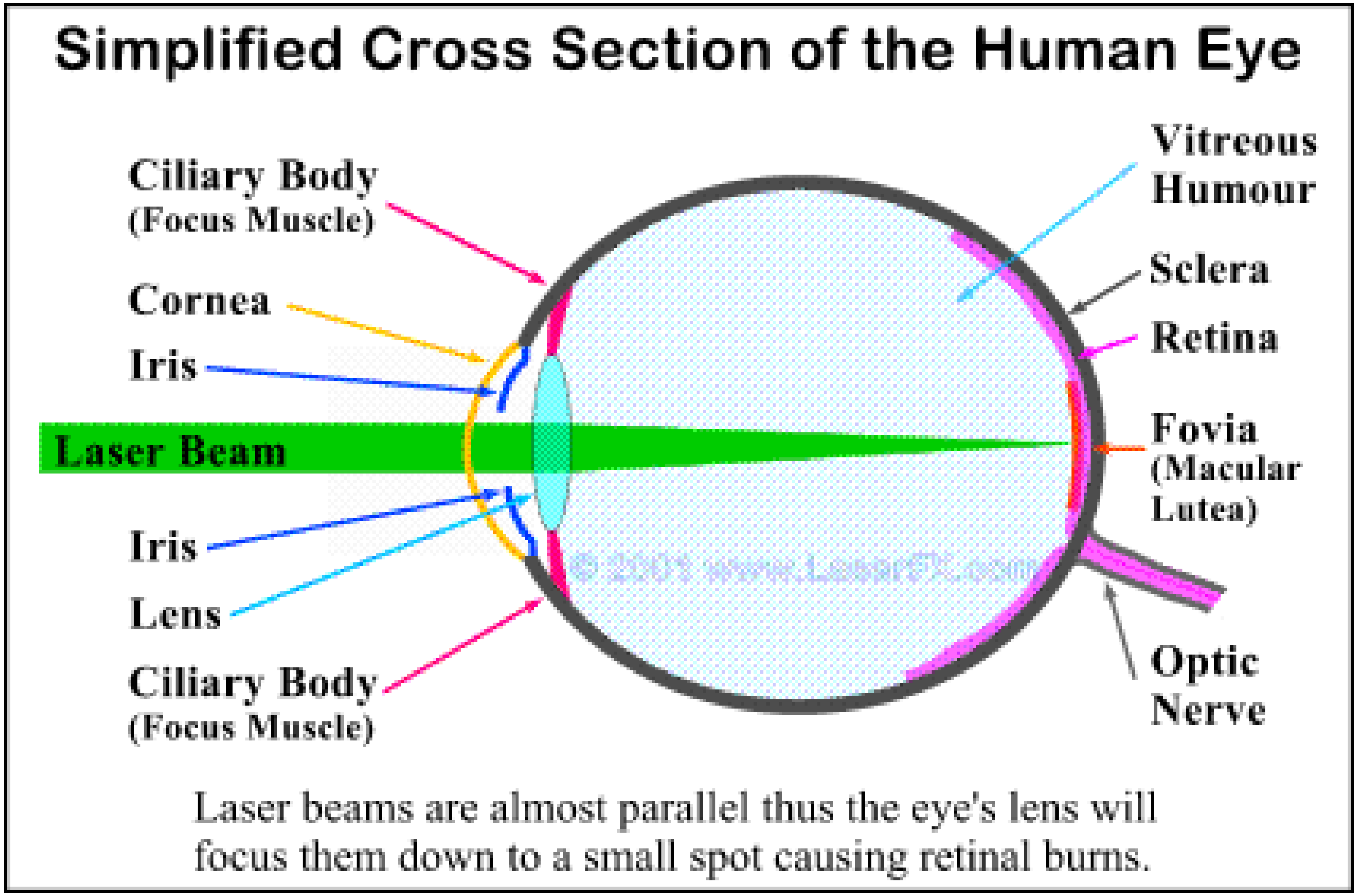
Κατανομή αιτίων σε ατυχήματα λέιζερ (ΗΠΑ, 1964-1992)



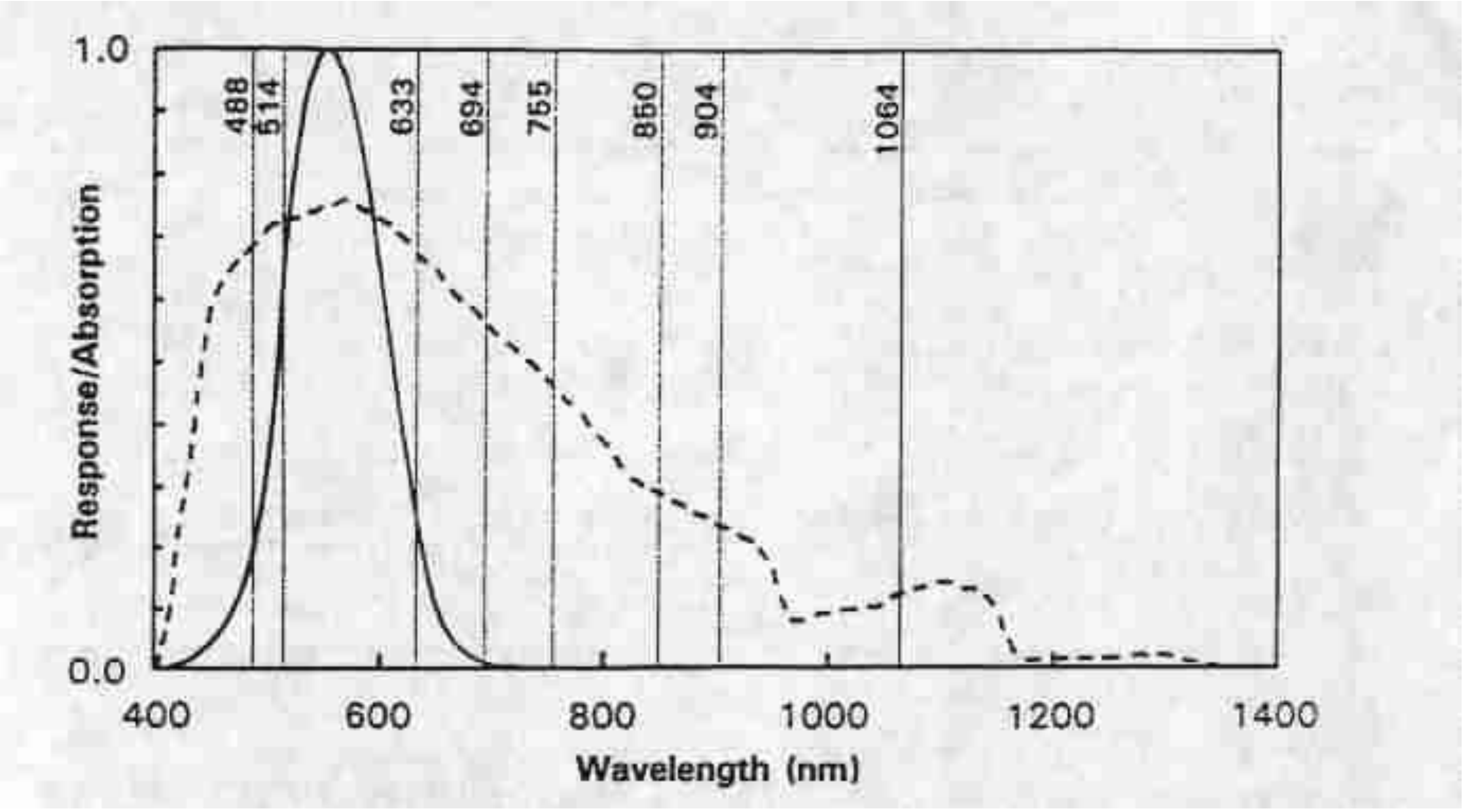
Τα περισσότερα ατυχήματα συμβαίνουν κατά τη διαδικασία ευθυγράμμισης ή/και λόγω μη χρήσης κατάλληλων προστατευτικών γυαλιών

http://www.adm.uwaterloo.ca/infohs/lasermanual/documents/section11.html

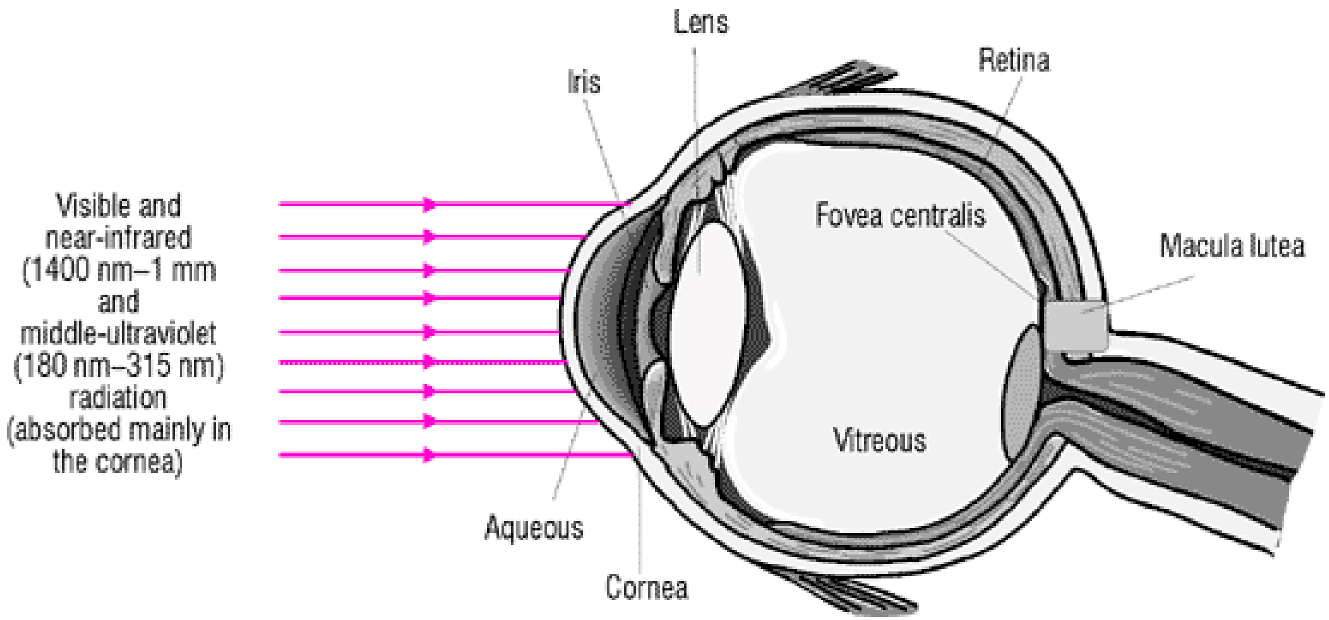
ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΜΑΤΙ



ΟΠΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΜΑΤΙΟΥ



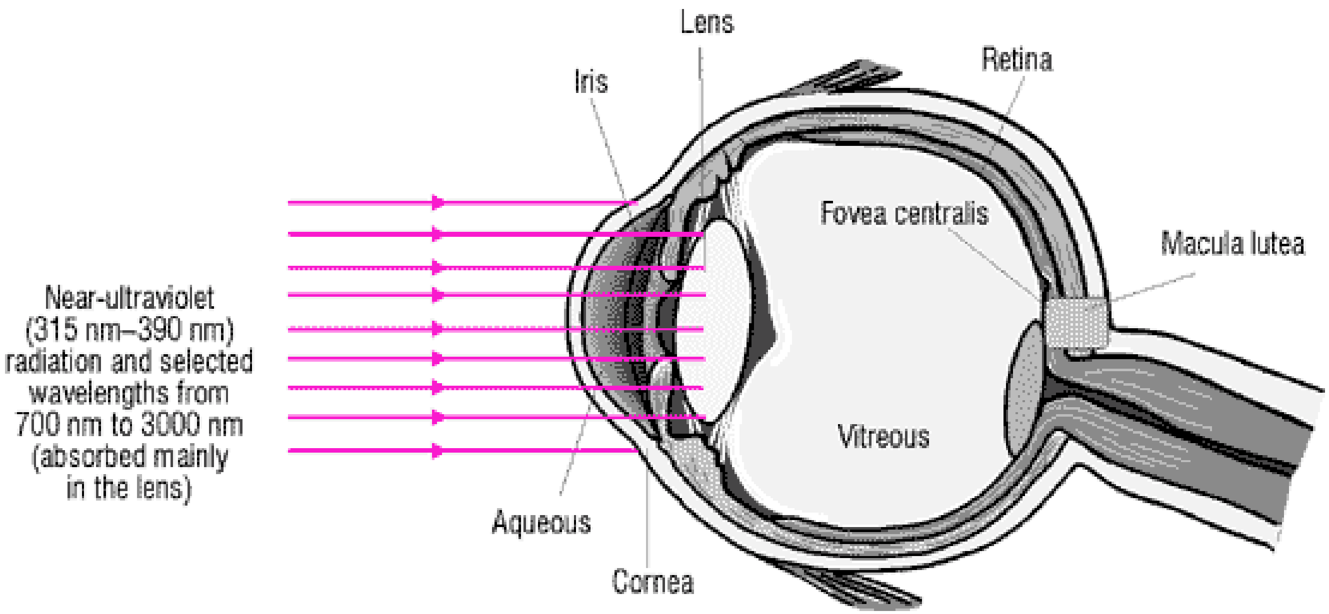
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΜΑΤΙ



Mid- and Far-Infrared (1400 nm – 1mm)
Mid-Ultraviolet (180 nm –315 nm)

Απορρόφηση στον κερατοειδή

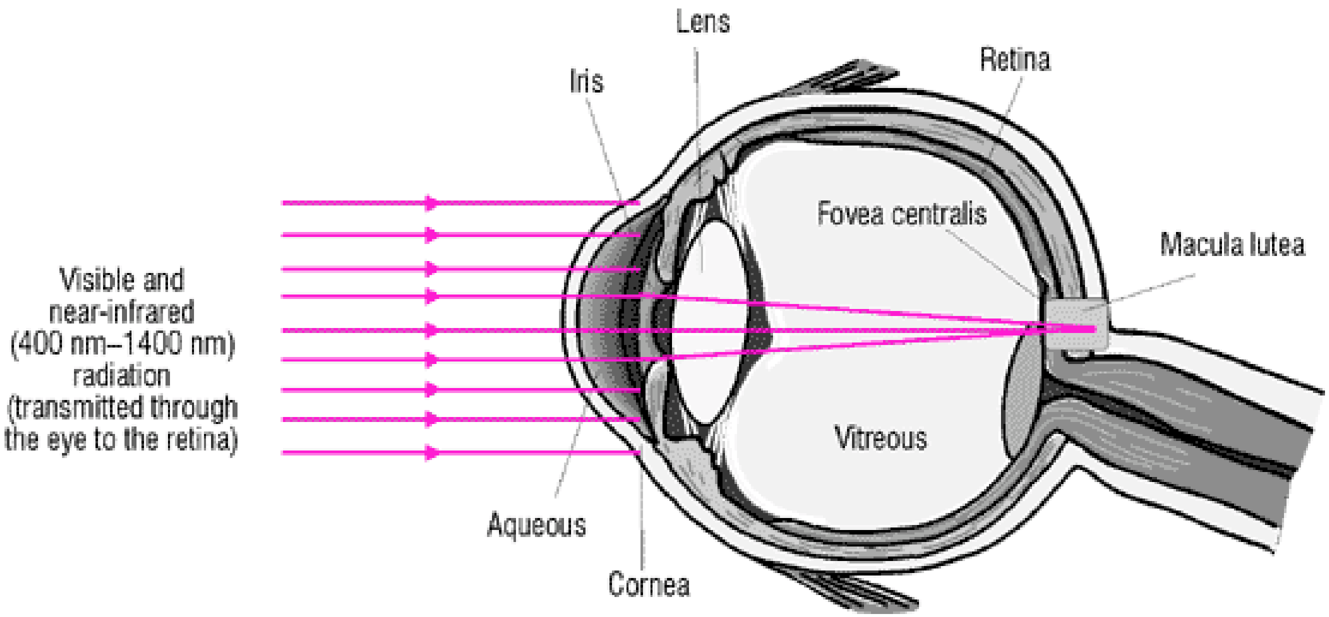
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΜΑΤΙ



Near-Ultraviolet (315 nm – 390 nm)
Selected wavelengths in 700 nm – 3000 nm)

Απορρόφηση στον φακό

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΜΑΤΙ



Visible and Near-Infrared (400 nm – 1400 nm)

Η ακτινοβολία εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΒΛΑΒΗΣ ΙΣΤΩΝ

- Θερμικά φαινόμενα (εγκαύματα)
- Φωτοχημικές αλλοιώσεις
- Ακουστικά κύματα
- Χρόνια προσβολή

Photobiological spectral domain	***Eye effects***	***Skin effects***
Ultraviolet C (0.200-0.280 μm)	Photokeratitis	Erythema (sunburn) Skin cancer
Ultraviolet B (0.280-315 μm)	Photokeratitis	Accelerated skin aging Increased pigmentation
Ultraviolet A (0.315-0.400 μm)	Photochemical UV cataract	Pigment darkening Skin burn
Visible (0.400-0.780 μm)	Photochemical and thermal retinal injury	Photosensitive reactions Skin burn
Infrared A (0.780-1.400 μm)	Cataract, retinal burns	Skin burn
Infrared B (1.400-3.00 μm)	Corneal burn Aqueous flare IR cataract	Skin burn
Infrared C (3.00-1000 μm)	Corneal burn only	Skin burn

ΚΑΝΟΝΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ LASER

- **Απαγορεύεται η είσοδος μη εξουσιοδοτημένων ατόμων στα εργαστήρια**
- **Υποχρεωτική για όλους η παρακολούθηση ειδικού σεμιναρίου ασφάλειας**
- **Στα εργαστήρια επιβάλλεται η χρήση κατάλληλων προστατευτικών γυαλιών**
- **Κατά τη διαδικασία ευθυγράμμισης αλλά και κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων λαμβάνονται αυστηρά μέτρα ώστε να αποκλειστεί η πιθανότητα άμεσης ή έμμεσης έκθεσης σε ακτινοβολία λέιζερ**
- **Προσοχή στην ακτινοβολία UV και IR**
- **Απαραίτητη από όλους η υιοθέτηση κανόνων καλής εργαστηριακής πρακτικής**

ΠΡΟΛΗΨΗ - ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Υποχρεωτική η χρήση κατάλληλων γυαλιών ασφαλείας κατά την παρουσία σε εργαστήρια λέιζερ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Δέσμη παλμικού λέιζερ, διαμέτρου 2 mm, με ενέργεια ανά παλμό 2.5 mJ, ανακλώμενη σε ποσοστό 4% από οπτικό έχει πυκνότητα ενέργειας

$$(0.04 x 2.5 x 10^{-3}\ J)/(0.25 x \pi x\ (0.2)^2\ cm^2) = 3.2\ 10^{-3}\ J/cm^2$$

Η οποία υπερβαίνει το κατώφλι βλάβης του κερατοειδούς ($\sim 10^{-7}\ J/cm^2$) κατά παράγοντα $\sim 3x10^4$.

Προστασία σε έκθεση αυτού του επιπέδου απαιτεί χρήση προστατευτικών γυαλιών με οπτική πυκνότητα στο μήκος κύματος της ακτινοβολίας του λέιζερ

$$(OD) = \log(3.2x10^4) = 4.5$$

Νόμος Beer: A ή (O.D.) = -logT = log(Io/I)

ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ LASER

- Αρχικά ρυθμίζομε το laser να λειτουργεί σε χαμηλή ισχύ / ενέργεια εξόδου
- Σχεδιάζουμε πολύ προσεκτικά τη διαδρομή της δέσμης και επιλέγουμε τα κατάλληλα οπτικά (κάτοπτρα, πρίσματα, φακούς, φράγματα περίθλασης κλπ).
- Με τη βοήθεια 2 (ΔΥΟ) κινητών πετασμάτων χαμηλής ανακλαστικότητας (συνήθως από χαρτί, πλαστικό ή βαμμένο μέταλλο) επιτρέπουμε τη σταδιακή διάδοση της δέσμης από την έξοδο του λέιζερ μέχρι το πρώτο οπτικό στοιχείο.
- Ελέγχουμε προσεκτικά την κατεύθυνση της δέσμης μετά το πρώτο οπτικό καθώς και την εμφάνιση πιθανών ανακλάσεων.
- Συνεχίζουμε μέχρι την ασφαλή κατάληξη της δέσμης στο μετρητικό όργανο ή το δείγμα μας.

- ΠΡΟΣΟΧΗ :

  Ταχύτητα φωτός = $3x10^8$m/s >>ανθρώπινα ανακλαστικά

ΚΑΝΟΝΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ LASER

Σήμανση συσκευών λέιζερ και εργαστηρίων

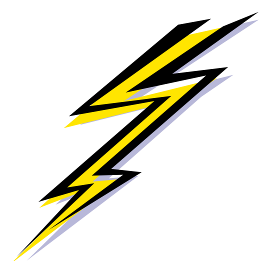
ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΩΝ

- **ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER**
- **ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ**
  Υψηλή τάση, Απλή τροφοδοσία και UPS
- **ΧΗΜΙΚΑ**
  ΑΕΡΙΑ (Φιάλες)
  ΥΓΡΑ (Οξέα/Βάσεις, Οργανικοί διαλύτες)
  ΣΤΕΡΕΑ
  ΑΠΟΒΛΗΤΑ
- **ΔΙΑΦΟΡΑ**
  Τροφοδοσία νερού
  Συσκευές συνεχούς λειτουργίας

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ

- Υψηλή τάση
- Απλή τροφοδοσία και UPS

Λέιζερ κατηγορίας 3 και 4 (Class3, Class 4) περιλαμβάνουν τροφοδοτικά παροχής υψηλής τάσης (1-10 kV)



ΧΗΜΙΚΑ

- ΑΕΡΙΑ

  Τοξικά ή αδρανή φυλάσσσονται σε ειδικές φιάλες (πειράματα, λειτουργία excimer laser)

- ΥΓΡΑ

  Οξέα/Βάσεις, Οργανικοί διαλύτες, Αντιδραστήρια, Οργανικές χρωστικές

- ΣΤΕΡΕΑ

- ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

ΔΙΑΦΟΡΑ

- ΦΩΤΙΑ

  Βραχυκύκλωμα (ΠΡΟΣΟΧΗ σε καλώδια τροφοδοσίας)
  Λέιζερ (Ανάφλεξη πλαστικών, χαρτιού, ρούχων)

- ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΝΕΡΟΥ

  ΠΡΟΣΟΧΗ σε σωληνώσεις νερού ψύξης

- ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ